

**REDISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN PUENTES  
ATIRANTADOS POR CAMBIOS DE TENSIONES EN LOS  
CABLES. CASO PUENTE GILBERTO ECHEVERRI, 4 SUR**

**LUCAS SEÑA CAICEDO**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil**

**DOCTOR CARLOS ANDRÉS BLANDÓN URIBE**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA  
INGENIERIA CIVIL  
2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos al Ingeniero Héctor Urrego, Alejandro Ospina, la Secretaría de Infraestructura de Medellín, Inteinsa por el apoyo en el suministro de datos y modelos numéricos.

# CONTENIDO

pág.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PRELIMINARES.....	2
2.1 Planteamiento del problema .....	2
2.2 Objetivos del proyecto .....	3
2.2.1 Objetivo General.....	3
2.2.2 Objetivos Específicos .....	3
2.3 Marco de referencia.....	3
2.3.1 Puentes atirantados.....	3
2.3.2 Teoría general de cables .....	4
2.3.3 Modelado de la estructura .....	4
2.3.4 Fatiga .....	4
2.3.5 Cargas actuantes .....	5
2.3.6 Medición de Vibraciones.....	5
2.3.7 Formulas empíricas para determinar la tensión en cables .....	7
2.3.8 Transformada de Fourier .....	8
2.3.9 Sensores y Equipo .....	10
2.3.10 Marco contextual .....	10
3. METODOLOGÍA.....	12
3.1 ESTADO DEL ARTE .....	13
4. PROCEDIMIENTO .....	15

4.1	Monitoreo e instrumentación.....	15
4.2	Tensión en los tirantes del puente .....	16
4.2.1	Verificación de las fuerzas de los tirantes de lados opuestos .....	18
4.2.2	Descomposición de la tensión en los cables... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
4.2.3	Verificación del peso del tablero con la componente vertical de la tensión .	22
4.3	Monitoreo .....	22
4.4	Procesamiento de datos mediciones .....	26
4.5	determinacion de tensiones mediante formulas empiricas.....	32
4.6	modelo numerico .....	36
4.7	Distribucion de esfuerzos .....	38
4.8	Analisis de variabilidad .....	42
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	50
5.1	Determinar la distribución de esfuerzos reales de los cables en el puente a partir de mediciones de vibración de los cables o directamente a partir de celdas de carga.	50
5.2	Comparar los esfuerzos reales en los cables con los esfuerzos obtenidos a partir del modelo numérico utilizado en la etapa de diseño. ....	51
5.3	Identificar analíticamente los rangos de variación de los esfuerzos en los elementos del puente debido a las diferencias entre los esfuerzos reales en los cables y los estimados inicialmente en la etapa de diseño.....	52
6.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	53
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	54

## LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 4-1. TIRANTES CON SENSORES DE CARGA.....	15
TABLA 4-2 TENSIONES DE LA PRIMERA Y SEGUNDA FASE DE TENSIONAMIENTO (CABLE 1-9) .....	16
TABLA 4-3 TENSIONES DE LA PRIMERA Y SEGUNDA FASE DE TENSIONAMIENTO (CABLE 10-18) .....	17
TABLA 4-4 ÁNGULOS RESPECTO AL TABLERO.....	19
TABLA 4-5 TENSIONES EN LA DIRECCIÓN X,Y,Z CABLES (1 AL 9) .....	20
TABLA 4-6 TENSIONES EN LA DIRECCIÓN X,Y,Z CABLES (1 AL 9) .....	21
TABLA 4-7 PESO DEL TABLERO.....	22
TABLA 4-8 Tensión TOTAL CABLES .....	22
TABLA 4-9 LECTURAS DE CARGA RECOLECTADAS DE LOS 12 SENSORES, TENSIONES MÁXIMAS Y MINIMAS REGISTRADAS. ....	23
TABLA 4-10 PROPIEDAD DEL TIRANTE 3 IZQUIERDO (EMCOCACLES, 2014) .....	26
TABLA 4-11 PROPIEDAD DEL TIRANTE 6 IZQUIERDO (EMCOCACLES, 2014) .....	27
TABLA 4-12 PROPIEDAD DEL TIRANTE 10 IZQUIERDO (EMCOCACLES, 2014) .....	27
TABLA 4-13 PROPIEDAD DEL TIRANTE 12 IZQUIERDO (EMCOCACLES, 2014) .....	28
TABLA 4-14 PROPIEDAD DEL TIRANTE 16 IZQUIERDO (EMCOCACLES, 2014) .....	28
TABLA 4-15 FRECUENCIA NATURAL DE LOS CABLES MONITOREADOS.....	32
TABLA 4-16 TENSIONES OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA DIRECCIÓN 1 .....	32
TABLA 4-17 TENSIONES OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA DIRECCIÓN 2 .....	33
TABLA 4-18 Tensión INICIALES DE DISEÑO (PESO PROPIO MÁS CARGA MUERTA) .....	37
TABLA 4-19 Tensión INICIALES DE DISEÑO (PESO PROPIO MÁS CARGA MUERTA) .....	37
TABLA 4-20 RESISTENCIA ULTIMA TIRANTES .....	42

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
ILUSTRACIÓN 2-1 PUENTE ATIRANTADO (VIRLOGEUX, 1999)	3
ILUSTRACIÓN 2-2. <i>DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS DE UN CABLE EXCITADO</i> (GIORDANO AVELLANEDA, 2012)	4
ILUSTRACIÓN 2-3. LOS DAÑOS DEBIDOS A LA FATIGA POR ROZAMIENTO Y LA CORROSIÓN (LAMINE DIENG A, 2013)	5
ILUSTRACIÓN 2-4 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN-LECTURA DE DATOS (UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, 2013)	6
ILUSTRACIÓN 2-5. EL MOVIMIENTO DE LA MASA ES REGISTRADO POR MEDIO DE UN TRANSDUCTOR (UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, 2013)	6
ILUSTRACIÓN 2-6 EL MOVIMIENTO DE LA MASA ES REGISTRADO CON RESPECTO A LA CARCASA (UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, 2013)	7
ILUSTRACIÓN 2-7 GRAFICO DOMINIO DEL TIEMPO (ROJO) Y DOMINIO DE LA FRECUENCIA (AZUL) (TRANSFORMADA DE FOURIER)	9
ILUSTRACIÓN 2-8. FILTRO (UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, 2013)	10
ILUSTRACIÓN 2-9 PUENTE GILBERTO ECHEVERRI MEJÍA (ELCOLOMBIANO, 2012)	11
ILUSTRACIÓN 4-1 PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA TENSIÓN (CABLE 1 AL 9)	18
ILUSTRACIÓN 4-2 PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA TENSIÓN (CABLE 10 AL 18)	18
ILUSTRACIÓN 4-3 GEOMETRÍA DE LOS CABLES (G. MATTEONI, 2012)	19
ILUSTRACIÓN 4-4 SECCIÓN DEL TABLERO, CORTE B'-B PUENTE 4 SUR	22
ILUSTRACIÓN 4-5 CARGA VS TIEMPO DE TIRANTES IZQUIERDOS QUE TIENEN SENSOR (INTEINSA, 2011)	24
ILUSTRACIÓN 4-6 TENSIÓN DEL TIRANTE 2 DERECHO VS TIRANTE 6 DERECHO (INTEINSA, 2011)	24
ILUSTRACIÓN 4-7 CARGA VS TIEMPO DE TIRANTES 3,8 Y 11 CENTRAL (INTEINSA, 2011)	25
ILUSTRACIÓN 4-8 CARGA VS TIEMPO TIRANTE 6 DERECHO Y TIRANTE 6 IZQUIERDO	25
ILUSTRACIÓN 4-9 CARGA VS TIEMPO COMPARACIÓN TIRANTE 3 DERECHO CON TIRANTE 3 IZQUIERDO	26
ILUSTRACIÓN 4-10 FILTRADO DE LA SEÑAL DEL TIRANTE 3 IZQUIERDO	29

ILUSTRACIÓN 4-11 FILTRADO DE LA SEÑAL DEL TIRANTE 6 IZQUIERDO	30
ILUSTRACIÓN 4-12 FILTRADO DE LA SEÑAL DEL TIRANTE 10 IZQUIERDO	30
ILUSTRACIÓN 4-13 FILTRADO DE LA SEÑAL DEL TIRANTE 12 IZQUIERDO	31
ILUSTRACIÓN 4-14 FILTRADO DE LA SEÑAL DEL TIRANTE 16 IZQUIERDO	31
ILUSTRACIÓN 4-15 RESULTADOS DE LA TENSION DEL TIRANTE 3 IZQUIERDO.	33
ILUSTRACIÓN 4-16 RESULTADOS DE LA TENSION DEL TIRANTE 6 IZQUIERDO.	34
ILUSTRACIÓN 4-17 RESULTADOS DE LA TENSION DEL TIRANTE 10 IZQUIERDO.	34
ILUSTRACIÓN 4-18 RESULTADOS DE LA TENSION DEL TIRANTE 12 IZQUIERDO.	35
ILUSTRACIÓN 4-19 RESULTADOS DE LA TENSION DEL TIRANTE 16 IZQUIERDO.	35
ILUSTRACIÓN 4-20 MODELO ESTRUCTURAL DEL PUENTE CAJAMARCA, DESARROLLADO EN SAP-2000	36
ILUSTRACIÓN 4-21 ESFUERZO MÁXIMO EN EL TABLERO DEBIDO AL PESO PROPIO LADO SURORIENTE	38
ILUSTRACIÓN 4-22 ESFUERZO MÁXIMO EN EL TABLERO DEBIDO AL PESO PROPIO SUROCCIDENTE	38
ILUSTRACIÓN 4-23 CARGA AXIAL EN LAS TORRES DEBIDO A LA CARGA MUERTA	39
ILUSTRACIÓN 4-24 ESFUERZO MÁXIMO EN EL TABLERO DEBIDO A LAS FUERZAS REALES LADO SURORIENTE	40
ILUSTRACIÓN 4-25 ESFUERZO MÁXIMO EN EL TABLERO DEBIDO A LAS FUERZAS REALES LADO SUROCCIDENTE	40
ILUSTRACIÓN 4-26 CARGA AXIAL EN LAS TORRES DEBIDO A LAS FUERZAS REALES	41
ILUSTRACIÓN 4-27 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 3 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES IZQUIERDOS	42
ILUSTRACIÓN 4-28 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 6 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES IZQUIERDOS	43
ILUSTRACIÓN 4-29 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 10 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES IZQUIERDOS	43
ILUSTRACIÓN 4-30 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 12 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES IZQUIERDOS	44
ILUSTRACIÓN 4-31 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 16 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES IZQUIERDOS	44
ILUSTRACIÓN 4-32 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 3 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES DERECHOS	45
ILUSTRACIÓN 4-33 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 6 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES DERECHOS	45
ILUSTRACIÓN 4-34 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 10 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES DERECHOS	46

ILUSTRACIÓN 4-35 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 12 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES DERECHOS	46
ILUSTRACIÓN 4-36 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 16 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES DERECHOS	47
ILUSTRACIÓN 4-37 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 3 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES CENTRALES	47
ILUSTRACIÓN 4-38 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 6 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES CENTRALES	48
ILUSTRACIÓN 4-39 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 10 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES CENTRALES	48
ILUSTRACIÓN 4-40 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 12 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES CENTRALES	49
ILUSTRACIÓN 4-41 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD TIRANTE 16 IZQUIERDO ELIMINANDO TIRANTES CENTRALES	49



## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
ECUACIÓN 2-1 LAS FÓRMULA PARA ESTIMAR LA TENSIÓN DEL CABLE CONSIDERANDO EL EFECTO FLECHA DEL CABLE (WEI-XIN REN, 2005) .....	7
ECUACIÓN 2-2 LAS FÓRMULAS PARA ESTIMAR LAS TENSIONES DEL CABLE CONSIDERANDO EL EFECTO DE RIGIDEZ (WEI-XIN REN, 2005) .....	8
ECUACIÓN 2-3 LAS FÓRMULAS PARA ESTIMAR LAS TENSIONES DEL CABLE SIN CONSIDERAR EL EFECTO DE RIGIDEZ Y EL EFECTO DE CATENARIA (WEI-XIN REN, 2003).....	8
ECUACIÓN 2-4 TRANSFORMADA DE FOURIER .....	9
ECUACIÓN 2-5 TRANSFORMADA DE INVERSA DE FOURIER.....	9

## LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO 1

16

## **RESUMEN**

En la siguiente investigación se presenta un análisis de la redistribución de esfuerzos en los elementos del puente (losa, tirantes, pilón) del puente Gilberto Echeverri 4 sur debido a los posibles cambios en los estados de tensiones en los cables, realizando mediciones directamente en los cables y a partir de la recolección de datos de las celdas de carga. Se explican los rangos de variación de los esfuerzos en los elementos del puente, para ello se recurre a un modelo numérico que permite estimar las variaciones de las magnitudes de la tensión de los cables durante la etapa de diseño con las actuantes durante la etapa de funcionamiento.

Palabras clave: Tensión, Redistribución de esfuerzos, Monitoreo e instrumentación, Modos de vibración, Señales.

## **ABSTRACT**

In the following investigation an analysis of the redistribution of stresses in the bridge elements (slab, suspenders, pylon) bridge Gilberto Echeverri 4 sur due to possible Changes in the states of tension in the cables is presented, making measurements directly on the wires and from the collection of data from load cells. The ranges of variation of the efforts in the bridge elements to it to a numerical model to estimate changes in the magnitudes of the tension of the wires during the design stage with the performers during the operation stage is used is explained.

Keywords: Stress, redistribution efforts, monitoring and instrumentation, modes of vibration signals.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras que prestan un servicio de conectividad vial y están sometidos a factores como exposición al medio ambiente y sismos, además del tránsito vehicular. Estos factores conllevan a diferentes escenarios de carga y descarga que generan desgaste de los elementos de la estructura por fatiga. Una de las tipologías que puede verse afectada por estos ciclos y por los cambios de los materiales con los cuales está construido es la de los puentes atirantados. Estos puentes consisten de un tablero soportado por cables rectos e inclinados fijados a unos mástiles.

En el diseño de estos puentes uno de los parámetros más difíciles de estimar es la variación en el tiempo de las condiciones iniciales de diseño debido a los factores ya mencionados. Para disminuir esta incertidumbre se empezaron a desarrollar sistemas de monitoreo y mantenimiento con el propósito de dar respuesta a la incapacidad de determinar con un nivel de confiabilidad aceptable el estado real de los cables y del sistema estructural en general.

Como parte de los procedimientos de mantenimiento y verificación de diseño de puentes atirantados comúnmente se “revisan el pilón, el tablero y los tirantes. Para los dos primeros existen pruebas de laboratorio y procesos de instrumentación que permiten verificar y estimar las propiedades mecánicas de los materiales que los componen, sin embargo, en el caso de los tirantes, el procedimiento actual se basa en una revisión visual” (Giordano Avellaneda, 2012). Este método resulta ineficiente dado que solo se detectan los cambios o daños superficiales, obteniendo solo resultados cualitativos, los cuales no permiten cuantificar el estado interno de los elementos.

Al no conocer de forma confiable el cambio en el estado de tensiones en los cables de pretensionamiento debido a los efectos de largo plazo es difícil estimar los estados de esfuerzos en los diferentes elementos que conforman el sistema estructural del puente. En algunos casos la redistribución de esfuerzos en la losa de puentes atirantados no se afecta significativamente con el cambio de tensiones en los cables, sin embargo, en otros casos, como el puente Gilberto Echeverri, debido a características particulares, dicha variación en las tensiones de los cables pueden influir significativamente en los demás elementos estructurales.

## **2. PRELIMINARES**

### **2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los puentes atirantados, al igual que cualquier obra de infraestructura, son estructuras que se deterioran con el tiempo. Este deterioro se debe a varias razones tales como la fatiga causada por las cargas de tráfico repetitivas, efectos de elementos ambientales y fenómenos extremos como un terremoto.

Durante la vida útil de un puente se deben satisfacer diferentes requerimientos, los cuales no siempre se consideran durante la etapa de diseño. Por lo cual, durante la vida útil la estructura puede presentar variaciones de los esfuerzos en los diferentes elementos debido al incremento de cargas, cambios en las propiedades de los materiales, daño de los elementos estructurales y defectos de diseño o construcción. Debido a esto es necesario evaluar los efectos que producen la redistribución y variación de esfuerzos en el puente para determinar sobrecargas en elementos de la estructura que puedan afectar su seguridad.

Existe un nivel de incertidumbre del comportamiento real de una estructura. Esta incertidumbre se puede incrementar debido a los efectos a largo plazo. Dichos efectos se deben a la relajación y flujo plástico de los materiales que constituyen los elementos del puente. Estos fenómenos producen cambios en los esfuerzos de los cables y en la distribución de fuerzas dentro del sistema estructural.

Los cambios en las características estructurales: como la rigidez, vibración y fatiga, generan degradación en los cables y cambios en la respuesta de la estructura frente a los diferentes escenarios de carga que afectan el puente.

Es necesario evaluar los efectos en la redistribución de esfuerzos en los elementos de puentes atirantados debido a los cambios en los estados de esfuerzos en los cables que lo soportan. Pues es posible que dicha redistribución cause sobreesfuerzos en varios elementos del puente que podrían ocasionar daños o debilitar la estructura.

Los resultados obtenidos en esta investigación pretenden establecer rangos de redistribución de esfuerzos en los elementos del puente (losa, tirantes, pilón) debido a los posibles cambios en los estados de tensiones de los cables.

## **2.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **2.2.1 Objetivo General**

Determinar la redistribución de esfuerzos en el puente Gilberto Echeverri 4 sur debido a los posibles cambios en los estados de tensiones en los cables.

### **2.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la distribución de esfuerzos reales de los cables en el puente a partir de mediciones de vibración de los cables o directamente a partir de celdas de carga.
- Comparar los esfuerzos reales en los cables con los esfuerzos obtenidos a partir del modelo numérico utilizado en la etapa de diseño.
- Identificar analíticamente los rangos de variación de los esfuerzos en los elementos del puente debido a las diferencias entre los esfuerzos reales en los cables y los estimados inicialmente en la etapa de diseño.

## **2.3 MARCO DE REFERENCIA**

### **2.3.1 Puentes atirantados**

Los puentes atirantados consisten de un tablero soportado por cables rectos e inclinados fijados en los mástiles (ver Ilustración 2-1). Se han tornado comunes debido a su economía y estabilidad para luces grandes, 200 m a 1000 m. Tienen tres partes principales: tablero, mástiles y tirantes. El tablero es soportado elásticamente en varios puntos a lo largo de su extensión por cables inclinados (tirantes) fijados en el mástil. Las cargas permanentes y móviles son transmitidas al mástil mediante los tirantes con una estructura reticulada, con tirantes traccionados mientras el mástil y el tablero quedan comprimidos. (Quintana, 2013)

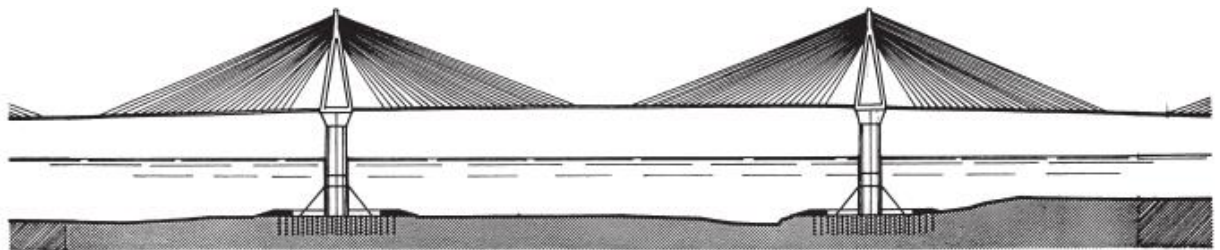


Ilustración 2-1 puente atirantado (Virlogeux, 1999)

### 2.3.2 Teoría general de cables

Los cables son elementos flexibles que debido a sus dimensiones transversales pequeñas en relación con su longitud, proveen rigidez sólo bajo esfuerzos de tracción dirigidos a lo largo del cable. La carga de tracción se reparte por igual entre los hilos del cable, permitiendo que cada hilo quede sometido a la misma tensión (Manzano, 2007). La rigidez de los cables se ve condicionada por la curvatura producida por el efecto de catenaria, efecto generado por la deformación debida al peso propio. Los esfuerzos presentes en un cable son inversamente proporcionales a la deformación producida por el peso propio. En la Ilustración 2-2 Se observa el diagrama de un cable cuando es excitado.

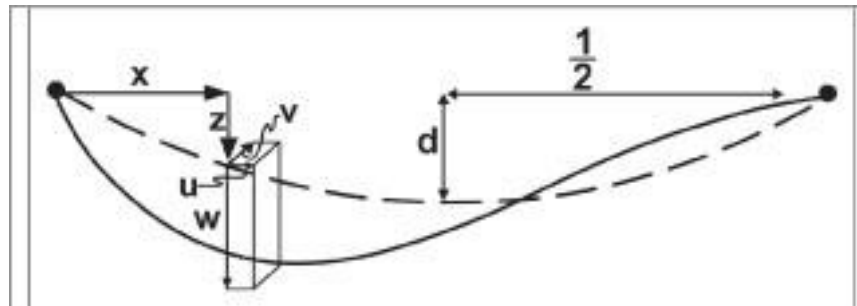


Ilustración 2-2. Diagrama de desplazamientos de un cable excitado (Giordano Avellaneda, 2012)

### 2.3.3 Modelado de la estructura

El modelado es la abstracción de lo real al papel de tal manera que me permita analizarlo y diseñarlo. En el modelado se debe buscar que la representación del sistema sea lo más parecido a la realidad; la ubicación y determinación de los apoyos, la selección del tipo de elemento, la combinación de estos y sus uniones juegan un papel primordial en esta etapa. (Duque, 2010)

### 2.3.4 Fatiga

Las vibraciones en los cables son inducidas por el tráfico, el viento y la lluvia. Han sido estudiadas en muchos documentos ya que potencialmente podrían inducir tensiones cíclicas que conducen a fenómenos de fatiga en los propios cables, así como en los anclajes. Los fenómenos de fatiga por rozamiento se producen cuando los cables son sometidos a vibraciones de alta amplitud, la fricción entre los mismos cables de acero o entre cables y el anclaje. Después de varios ciclos, los cables se rompen y la primera capa de cable está totalmente destruida (ver Ilustración 2-3). Para retrasar los daños de la fatiga por rozamiento, hay que reducir la amplitud de oscilación del cable mediante el

aumento del coeficiente de amortiguamiento del cable. En efecto, los tirantes tienen una capacidad de amortiguación intrínseca bastante baja (menos de 0,01%). La forma más convencional de limitar amplitudes de vibración consiste en el aumento de su capacidad de amortiguación estructural mediante dispositivos especiales de montaje. De esta manera es eficaz para casi todos los tipos de vibración, excepto la inestabilidad paramétrica. (Lamine Dieng a, 2013)



Ilustración 2-3. Los daños debidos a la fatiga por rozamiento y la corrosión (Lamine Dieng a, 2013)

### **2.3.5 Cargas actuantes**

La estructura está sometida a dos tipos de fuerzas: las externas y las internas. Las externas son las fuerzas externas que actúan sobre la estructura y las fuerzas que impiden el movimiento. Las internas son las fuerzas que se generan en las uniones de los diferentes elementos. Las fuerzas actuantes son las cargas ocasionadas por factores ambientales, peso propio y sismos. Las cargas gravitacionales se dividen en cargas vivas y cargas muertas y son generadas por el uso y el peso de los materiales de la estructura. Las cargas dinámicas son aplicadas de manera instantánea (Duque, 2010)

### **2.3.6 Medición de Vibraciones**

Con la medición de vibraciones se pretende identificar las diferentes magnitudes físicas de un sistema, para lo cual se deben realizar mediciones de desplazamiento, fuerzas, derivas respecto al tiempo y al espacio, dichas mediciones permiten realizar un análisis de señales del sistema y después de un adecuado procesamiento determinar diferentes propiedades dinámicas del mismo (ver Ilustración 2-4).



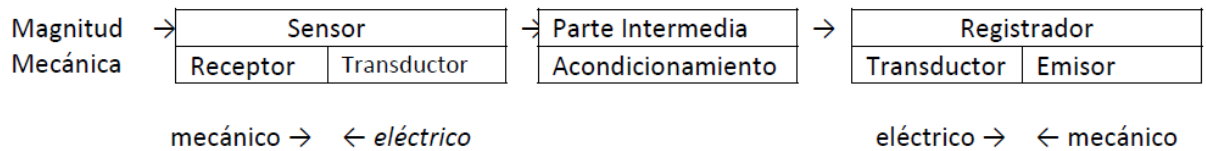


Ilustración 2-4 Esquema de un sistema de medición-lectura de datos  
(Universidad Nacional de Córdoba, 2013)

Los sensores de vibración constan de una parte mecánica y otra eléctrica. El sistema mecánico define el movimiento de la masa interna, cuyas oscilaciones son transformadas en impulsos eléctricos por el transductor incorporado (parte eléctrica). Los sensores poseen una constante  $C$  que está expresada en unidad de salida dividida unidad de entrada, por ejemplo  $[\text{mV} / \text{g}]$ ,  $[\text{V}/\text{ms}^{-1}]$  (Universidad Nacional de Córdoba, 2013).

Se manejan dos principios para realizar las mediciones

- **Principio de medición relativa:** es cuando se aplica vibración a la masa interna del sistema por medio de una punta lo cual permite medir el movimiento relativo de la punta respecto a la carcasa del sensor que es la referencia (ver Ilustración 2-5 ).

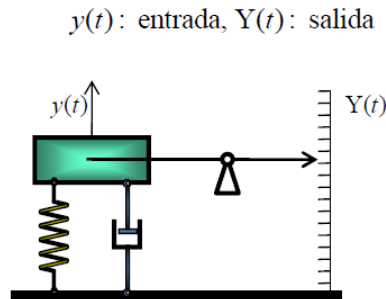


Ilustración 2-5. El movimiento de la masa es registrado por medio de un transductor  
(Universidad Nacional de Córdoba, 2013)

- **Principio de medición inercial:** la señal de entrada es aplicada a la carcasa del sensor, por lo cual el movimiento de la masa interna se mide con respecto a la carcasa del sensor (ver Ilustración 2-6).

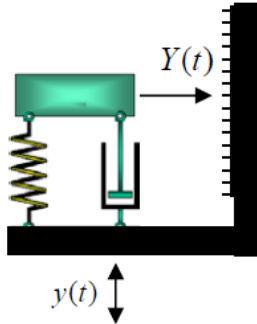


Ilustración 2-6 El movimiento de la masa es registrado con respecto a la carcasa (Universidad Nacional de Córdoba, 2013)

### 2.3.7 Fórmulas empíricas para determinar la tensión en cables

Las siguientes ecuaciones representan las relaciones explícitas entre la frecuencia fundamental y la tensión del cable. La relación  $\omega=2\pi$  se utiliza de tal manera que la frecuencia  $f$  este en Hz.

La fórmula para estimar la tensión del cable considerando el efecto flecha del cable (ver Ecuación 2-1 )

$$T = 4ml^2f^2 \quad (\lambda^2 \leq 0.17)$$

$$T = \sqrt[3]{ml^2(4f^2T^2 - 7.569mEA)} \quad (0.17 < \lambda^2 < 4\pi^2)$$

$$T = ml^2f^2 \quad (4\pi^2 \leq \lambda^2)$$

Ecuación 2-1 fórmula para estimar la tensión del cable considerando el efecto flecha del cable (Wei-Xin Ren, 2005)

- Las fórmulas para estimar las tensiones del cable considerando el efecto de rigidez (ver Ecuación 2-2).

$$T = 3.432ml^2f^2 - 45.191 \frac{EI}{l^2} \quad (0 \leq \xi \leq 18)$$

$$T = m \left( 2lf - \frac{2.363}{l} \sqrt{\frac{EI}{m}} \right)^2 \quad (18 < \xi \leq 210)$$

$$T = 4ml^2 f^2 \quad (210 < \xi)$$

Ecuación 2-2 fórmulas para estimar las tensiones del cable considerando el efecto de rigidez (Wei-Xin Ren, 2005)

La tensión en los cables es calculada directamente de la frecuencia de vibración mediante la siguiente formula (ver Ecuación 2-3). Esta fórmula no tiene en cuenta el efecto de catenaria ni la rigidez a flexión y debido a su simplificación está demostrado que puede incrementar el error en la determinación de las tensiones.

$$T = \frac{4\rho L^2 f_n^2}{n^2}$$

Ecuación 2-3 fórmulas para estimar las tensiones del cable sin considerar el efecto de rigidez y el efecto de catenaria (Wei-Xin Ren, 2003).

Donde

T=Tensión del cable

$\rho$ =Densidad lineal del cable

L=Distancia entre los extremos del cable

$f_n$ = enésima frecuencia natural del cable

$\lambda$ =Parámetro adimensional

$\xi$ =Parámetro adimensional que refleja el efecto de rigidez del cable

E: Módulo de elasticidad del cable

A: Área transversal del cable

En su forma más simple, un cable también se puede aproximar como una cuerda vibrante. Si se trata de su frecuencia natural se podría determinar entonces, conociendo todos los demás parámetros, de esta forma se puede determinar la fuerza del cable.

### 2.3.8 Transformada de Fourier

El procesamiento de señales es la manipulación de datos digitales que generalmente son generados mediante un proceso de conversión A/D, el cual consiste en la transcripción

de señales analógicas en señales digitales. Para realizar el procesamiento de las señales se recurre al análisis mediante la transformada de Fourier la cual permite limpiar, ubicar patrones, compactar y reacomodar la señal.

El procesamiento numérico usando este método consiste en la descomposición de una señal periódica en términos de señales periódicas básicas cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia original, entonces toda función de periodo T se puede expresar como una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo periodo T (ver Ilustración 2-7).

Las siguientes ecuaciones permiten calcular F(w) que es el dominio de la frecuencia a partir de f(t) que es el dominio del tiempo y viceversa (ver Ecuación 2-4 y Ecuación 2-5).

- $$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * e^{-i*t*w} dt$$

Ecuación 2-4 Transformada de Fourier

- $$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) * e^{i*t*w} dw$$

Ecuación 2-5 Transformada de inversa de Fourier

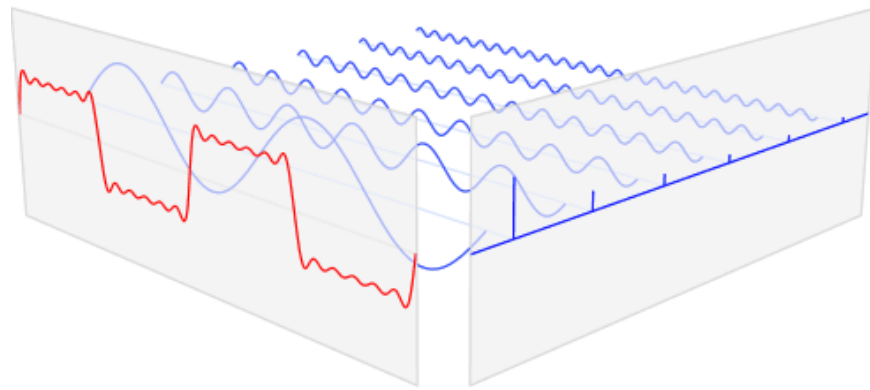


Ilustración 2-7 Grafico dominio del tiempo (rojo) y dominio de la frecuencia (azul) (Transformada de Fourier)

La transformada de Fourier puede reescribirse de la siguiente forma

- $$F = \{f(x)\} = F(k) = A(k) * e^{i*\theta*k}$$

- $A = |F(k)| = \sqrt{F_r^2 + F_i^2}$
- $A \equiv \text{Amplitud o magnitud espectral}$
- $\Theta \equiv \text{Fase espectral}$
- $A^2 = |F|^2 = F_r^2 + F_i^2 \equiv \text{Espectro de potencia}$

### 2.3.9 Sensores y Equipo

- **Galgas extensiométricas O Strain gages:** son dispositivos eléctricos para la medición de magnitudes como deformación, presión, torque, carga, etc. Estos dispositivos miden la deformación que presenta un cuerpo debido a una fuerza aplicada sobre él.
- **Acelerómetro piezoeléctrico:** son dispositivos que convierten la energía mecánica del movimiento en señales eléctricas, esto se logra por medio de un cristal que se encuentra en medio de la carcasa y una masa inercial.
- **Filtros:** Tienen como función remover una banda de frecuencias en una señal. Se utilizan para procesar señales obtenidas de los sensores y retirar las partes que no proveen información relevante sobre el sistema o elemento estructural.

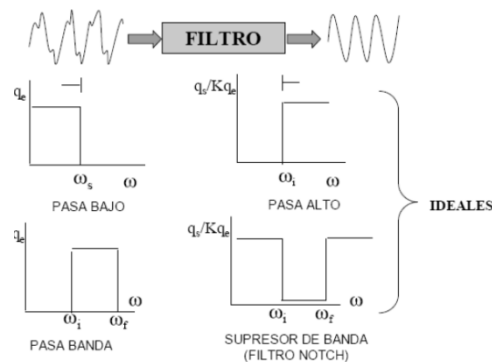


Ilustración 2-8. Filtro (Universidad Nacional de Córdoba, 2013)

### 2.3.10 Marco contextual

El puente atirantado Gilberto Echeverri Mejía ubicado en la ciudad de Medellín comunica los sectores del Poblado y Guayabal, el puente tiene una longitud de 560 m, un ancho de 40.5m, la luz principal es de 108 m y las luces laterales son de 53 m(ver Ilustración 2-9 ). Los cables que soportan el tablero están espaciados 12 m entre si y anclados a una torre de 37 m de altura. El puente cuenta con 8 carriles, andenes de 6.5 m y 2.5 m, un separador central de 2.95 m y un sobre ancho de 2 m. El puente consta de 51 cables de los cuales 12 cuentan con sistema de monitoreo.



Ilustración 2-9 Puente Gilberto Echeverri Mejía (ElColombiano, 2012)

### 3. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló en diferentes fases con el propósito de cumplir los objetivos propuestos.

Fase 1: Revisión de metodologías para estimación de fuerzas en cables, configuración del puente y estudio modelo numérico.

Actividad 1.1: Revisión de bibliografía relacionada con la estimación de la tensión en los cables.

Actividad 1.2: Estudio de la configuración estructural puente Gilberto Echeverri 4 sur.

Fase 2: Determinación de distribución de fuerzas en cables

Actividad 2.1: Determinar la distribución de esfuerzos reales de los cables en el puente a partir de mediciones de vibración de los cables o directamente a partir de celdas de carga. De ser posible estas mediciones se harán directamente en el sitio o se recurrirá a procesar datos existentes que proveerá la secretaria de infraestructura física de Medellín.

Actividad 2.2: Calibración del modelo estructural. Se trabajará con un modelo estructural existente facilitado por el diseñador del puente.

Fase 3: Determinación numérica y estudio de sensibilidad de distribución de esfuerzos en el puente

Actividad 3.1: Estudio del modelo numérico utilizado en la etapa de diseño.

Actividad 3.2: Determinación de la distribución de esfuerzos en la estructura en la etapa de diseño.

Actividad 3.3: Estudio de sensibilidad de la variación de esfuerzos en el puente debido a variaciones de las tensiones en los cables. Se analizará el comportamiento de la estructura realizando variaciones de los cables en el lado izquierdo, luego el derecho y en ciertos cables a ambos lados.

Actividad 3.4: Determinación de la distribución de esfuerzos en la estructura debida a los esfuerzos reales en los cables

#### Fase 4: Fase de análisis

Actividad 4.1: Comparar la distribución de esfuerzos de diseño y real en el puente.

Actividad 4.2: Identificar los rangos de variación de los esfuerzos en los elementos del puente debido a las diferencias entre los esfuerzos reales en los cables y los estimados inicialmente en la etapa de diseño.

### 3.1 ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta los estudios y avances realizados por varios autores tanto nacionales como internacionales que se resumen a continuación:

Wei-Xin Ren y Gang Chen han enfocado algunos de sus estudios e investigaciones al análisis de métodos de valoración de la tensión, condición y determinación de las vibraciones de los cables en puentes atirantados (Wei-Xin Ren, 2003). Analizaron el comportamiento del cable y su modelación matemática para el desarrollo de un análisis modal del cable y determinaron la distribución de fuerzas en los diferentes elementos de un puente atirantado con el método de vibración basado en la fuerza. Dentro de los resultados y recomendaciones que se obtuvieron se puede evidenciar que se podría utilizar el método de vibración basado en la fuerza para monitorear las frecuencias o fuerzas de tensión en los cables y obtener indicadores significativos de degradación en los cables. (Wei-Xin Ren, 2003)

Wei-Xin Ren y Gang Chen también realizaron un estudio sobre las fórmulas empíricas para estimar la tensión en los cables por medio de la frecuencia fundamental de los cables. Estos autores estimaron la tensión en los tirantes a partir de expresiones derivadas de la teoría de cables ajustada a través de procedimientos de laboratorio, las cuales consideran efectos como el de la catenaria, rigidez a flexión y geometría del cable. Dentro de los resultados y recomendaciones se obtuvo que las fórmulas empíricas son muy convenientes para determinar de manera rápida las tensiones en los cables, debido a que los resultados de los ensayos de laboratorio no reportaron mayor discrepancia con los parámetros de la literatura. (Wei-Xin Ren, 2005)

Edgar Muñoz, Federico Nunez, Jorge A. Rodríguez, Alfonso Ramos y Camilo Otálora realizaron estudios sobre la aplicación de métodos para estimar los esfuerzos en los tirantes de un puente atirantado usando sus modos y frecuencias naturales de vibración. En el estudio compararon diferentes métodos para estimar los esfuerzos en los tirantes con ayuda de registros de aceleración tomados al puente de Dos Quebradas y aplicando métodos empíricos y métodos analíticos. Se encontró que por lo menos el 40% de los tirantes de este puente tienen niveles de tensiones mayores a las admisibles



especificadas durante su diseño y a las recomendadas en la actualidad por el código "POST TENSIONING INSTITUTE" –PTI. (Edgar Muñoz, 2009)

Avellaneda, Noguera, Muñoz también han dedicado algunas de sus investigaciones a estimar la tensión en los cables de puentes atirantados por medio de mediciones experimentales o en campo o en laboratorio de sus modos y frecuencias naturales de vibración. En el estudio se busca determinar los esfuerzos en los tirantes a partir de sus modos y frecuencias naturales de vibración, se produjo un programa computacional basado en el análisis de señales y en el método de los elementos finitos. Se obtuvieron como resultados que la variable más propensa al cambio en los parámetros de entrada es la masa, “esta es inversamente proporcional a la frecuencia y su impacto en la estimación y cálculo de la tensión es tal que un cambio ligero en esta puede significar la variación de un error de 0.5% a 5%”. También se obtuvo que el método es confiable y versátil lo cual permite que se implemente en la práctica para revisiones rutinarias e interventorías de la estructura, igualmente podría ser una herramienta eficaz en el momento de realizar una valoración del estado de un puente ya sea con propósitos de amplificación o reparación. (Giordano Avellaneda, 2012)

La mayoría de los estudios se enfocan en la estimación de tensiones en los cables debido a que estos son los principales elementos que distribuyen los esfuerzos en la estructura, pero existen pocos antecedentes que evalúen los efectos de dichos cambios de tensiones en los demás elementos del puente.

## 4. PROCEDIMIENTO

Para el desarrollo de este proyecto se realizó inicialmente una recopilación de datos históricos de carga de los cables, con lo cual se pudieron realizar verificaciones de la evolución en el tiempo de las tensiones. Posteriormente se instrumentaron cinco cables del puente y se realizó un análisis del modelo numérico para conocer el comportamiento inicial del puente y ajustar los esfuerzos iniciales estimados en la etapa de diseño a los esfuerzos reales del puente.

### 4.1 MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN

El sistema de monitoreo, con el cual se realizó el seguimiento de la variación de las tensiones en el puente Gilberto Echeverry, 4 sur está a cargo de la empresa Inteinsa la cual lleva el registro de los 12 sensores de carga instalados durante el proceso de construcción. En la siguiente gráfica y tabla se presentan los elementos del puente seleccionados para este monitoreo.

Tabla 4-1. Tirantes con sensores de carga

Tirantes con sensor			
Tirante No.	Izquierdo	Central	Derecho
1	NO	NO	NO
2	NO	NO	SI
3	SI	SI	NO
4	NO	NO	NO
5	NO	NO	NO
6	SI	NO	SI
7	NO	NO	NO
8	NO	SI	NO
9	NO	NO	NO
10	SI	NO	NO
11	NO	SI	SI
12	SI	NO	NO
13	NO	NO	NO
14	NO	NO	NO
15	NO	NO	NO
16	SI	NO	NO
17	NO	NO	SI
18	NO	NO	NO

## 4.2 Tensión en los Tirantes del Puente

Los tirantes son los elementos primordiales en los puentes atirantados, debido a que estos deben soportar diferentes esfuerzos en las diferentes etapas de operación y construcción.

Para determinar las tensiones durante la etapa constructiva se procedió a realizar la recopilación de la bitácora de tensado de los cables, la cual muestra la evolución en el tiempo del tensado y algunos cambios durante la etapa constructiva. Esta recopilación permitió revisar la historia de la variación de las tensiones de los 51 tirantes y conocer las tensiones en el momento de entrega del puente (ver [Anexo 1](#)).

Tabla 4-2 Tensiones de la primera y segunda fase de tensionamiento (cable 1-9)

CABLE	UBICACION	#TORONES	Primer tensionamiento		Segundo tensionamiento	
			TENSION(ton)	TOTAL(ton)	TENSION(ton)	TOTAL(ton)
1	IZQUIERDO	43	6.99	300.57	10.33	444.19
	CENTRAL	85	7.76	659.60	10.16	863.6
	DERECHO	43	7.08	304.44	10.33	444.19
2	IZQUIERDO	27	8.26	223.02	11.11	299.97
	CENTRAL	77	8.67	667.59	10.44	803.88
	DERECHO	27	8.40	226.8	11.11	299.97
3	IZQUIERDO	26	8.58	223.08	11.08	288.08
	CENTRAL	48	6.43	308.64	10.25	492.00
	DERECHO	26	8.08	210.08	11.08	288.08
4	IZQUIERDO	20	8.60	172.00	11.4	228.00
	CENTRAL	102	5.11	521.22	1.071	109.242
	DERECHO	20	8.11	162.20	11.40	228.00
5	IZQUIERDO	27	9.15	247.05	11.11	299.97
	CENTRAL	-	-	-	-	-
	DERECHO	27	8.50	229.5	11.11	299.97
6	IZQUIERDO	22.00	7.83	172.26	10.91	240.02
	CENTRAL	103.00	4.36	449.08	10.49	1080.47
	DERECHO	22.00	7.38	162.36	10.91	240.02
7	IZQUIERDO	28	8.16	228.48	10.71	299.88
	CENTRAL	70	5.24	366.80	9.77	683.90
	DERECHO	28	7.67	214.76	10.71	299.88
8	IZQUIERDO	29	7.85	227.65	10.76	312.04
	CENTRAL	104	6.86	713.44	9.92	1031.68
	DERECHO	29	7.62	220.98	10.76	312.04
9	IZQUIERDO	37	8.08	298.96	10.70	395.90
	CENTRAL	109	8.46	922.14	10.32	1124.88
	DERECHO	37	8.02	296.74	10.70	395.90

Tabla 4-3 Tensiones de la primera y segunda fase de tensionamiento (cable 10-18)

CABLE	UBICACION	#TORONES	Primer tensionamiento		Segundo tensionamiento	
			TENSION(ton)	TOTAL(ton)	TENSION(ton)	TOTAL(ton)
10	IZQUIERDO	37	8.00	296.00	10.70	395.90
	CENTRAL	100	8.39	839.00	10.32	1032.00
	DERECHO	37	8.11	300.07	10.70	395.90
11	IZQUIERDO	29	7.61	220.69	10.76	312.04
	CENTRAL	104	6.82	709.28	9.92	1031.68
	DERECHO	29	7.75	224.75	10.76	312.04
12	IZQUIERDO	28	7.74	216.72	10.71	299.88
	CENTRAL	70	5.22	365.40	9.77	683.90
	DERECHO	28	7.69	215.32	10.71	299.88
13	IZQUIERDO	22	7.5	165.00	10.91	240.02
	CENTRAL	103	4.35	448.05	10.49	1080.47
	DERECHO	22	7.45	163.90	10.91	240.02
14	IZQUIERDO	27	8.58	231.66	11.11	299.97
	CENTRAL	-	-	-	-	-
	DERECHO	27	8.51	229.77	11.11	299.97
15	IZQUIERDO	20	8.60	172.00	11.40	228.00
	CENTRAL	102	5.11	521.22	10.71	1092.42
	DERECHO	20	8.53	170.60	10.40	208.00
16	IZQUIERDO	26	8.22	213.72	11.08	288.08
	CENTRAL	48	6.45	309.60	10.25	492.00
	DERECHO	26	8.16	212.16	11.08	288.08
17	IZQUIERDO	27	8.12	219.24	11.11	299.97
	CENTRAL	77	8.51	655.27	10.44	803.88
	DERECHO	29	7.43	215.47	10.34	299.86
18	IZQUIERDO	43	7.07	304.01	10.33	444.19
	CENTRAL	85	7.83	665.55	10.16	863.60
	DERECHO	-	-	-	-	-

En la Tabla 4-2 y en Tabla 4-3 se puede observar que durante la primera etapa de tensionamiento cuando el cable no soportaba la carga muerta en su totalidad y había una pequeña discrepancia entre la tensión del cable izquierdo y el cable derecho, por lo cual se desarrolla una segunda etapa de tensionamiento cuando ya el cable soportaba en su totalidad la carga muerta para eliminar esta discrepancia y lograr un ajuste óptimo.

#### 4.2.1 Verificación de las fuerzas de los tirantes de lados opuestos

Según el "POST TENSIONING INSTITUTE" las fuerzas en los cables no deben exceder en más del 15% las fuerzas de los cables del otro lado durante cualquier instante de la etapa de tensado.

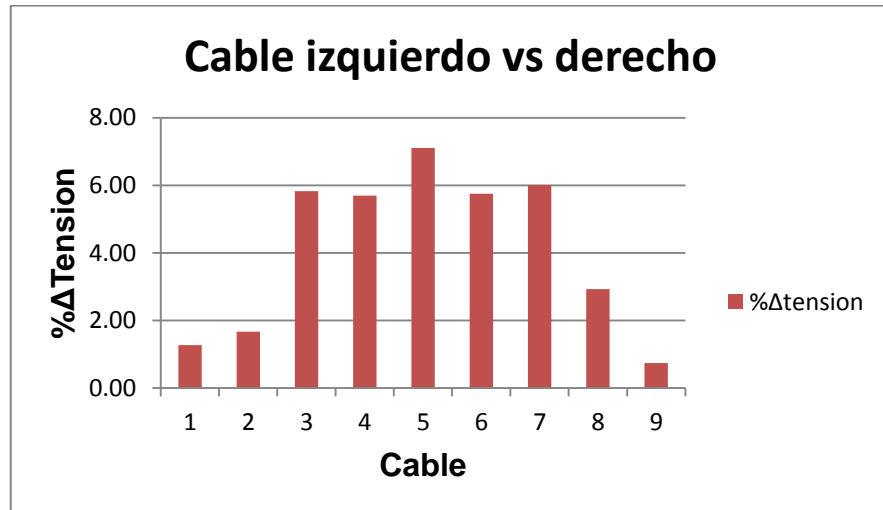


Ilustración 4-1 Porcentaje de variación de la tensión (cable 1 al 9)

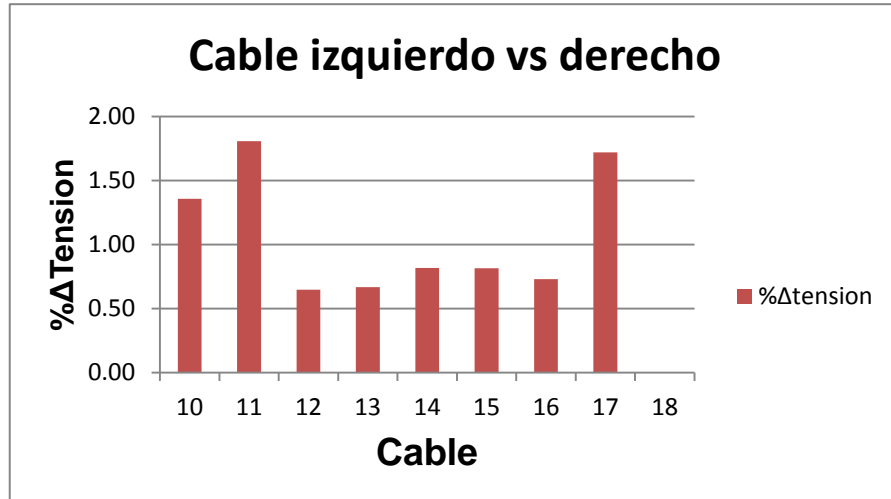


Ilustración 4-2 Porcentaje de variación de la tensión (cable 10 al 18)

Según la Ilustración 4-2 y Ilustración 4-1 todos los cables se encuentran dentro del equilibrio permisible que recomienda "POST TENSIONING INSTITUTE" lo

cual da lugar a que durante el proceso constructivo no se halla llevado al cable a un sobre tensionamiento.

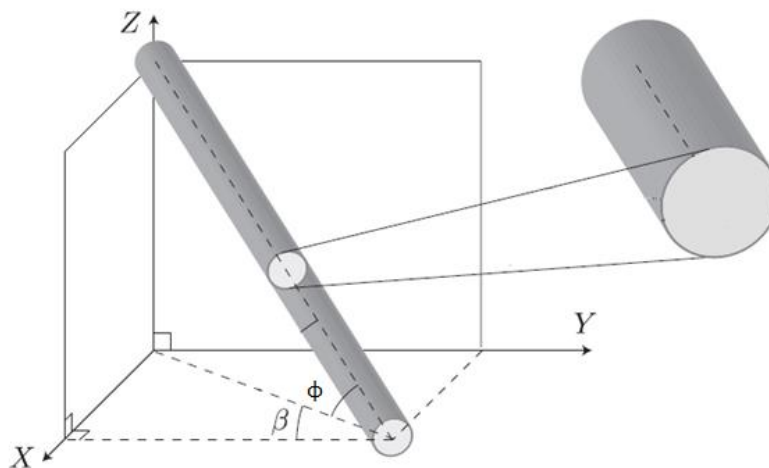


Ilustración 4-3 geometría de los cables (G. Matteoni, 2012)

Tabla 4-4 Ángulos respecto al tablero 1.

ANGULOS						
Tirante No.	Ubicación	X	Y	Z	$\phi$	$\beta$
1,9,10,18	Izquierdo	48	20.34	35.00	33.87	22.96
	Central	48	0.00	33.57	34.96	0.00
	Derecho	48	20.34	35.00	33.87	22.96
2,8,11,17	Izquierdo	36	20.34	31.71	37.48	29.46
	Central	36	0.00	30.29	40.07	0.00
	Derecho	36	20.34	31.71	37.48	29.46
3,7,12,16	Izquierdo	24	20.34	27.96	41.62	40.28
	Central	24	0.00	26.28	47.59	0.00
	Derecho	24	20.34	27.96	41.62	40.28
4,6,13,15	Izquierdo	12	20.34	21.92	42.86	59.46
	Central	12	0.00	19.57	58.48	0.00
	Derecho	12	20.34	21.92	42.86	59.46
5,14	Izquierdo	0	20.34	20.11	44.67	0.00
	Central	-	-	-	-	-
	Derecho	0	20.34	20.11	44.67	0.00

**Tabla 4-5 Tensiones en la dirección X,Y,Z cables (1 al 9)**

			TENSION(ton)
CABLE	UBICACION	TOTAL(ton)	Z
1	IZQUIERDO	444.19	247.59
	CENTRAL	863.60	494.95
	DERECHO	444.19	247.59
2	IZQUIERDO	299.97	182.55
	CENTRAL	803.88	517.55
	DERECHO	299.97	182.55
3	IZQUIERDO	288.08	191.37
	CENTRAL	492.00	363.30
	DERECHO	288.08	191.37
4	IZQUIERDO	228.00	155.11
	CENTRAL	109.242	93.13
	DERECHO	228.00	155.11
5	IZQUIERDO	299.97	210.90
	CENTRAL	-	-
	DERECHO	299.97	210.90
6	IZQUIERDO	240.02	163.29
	CENTRAL	1080.47	921.10
	DERECHO	240.02	163.29
7	IZQUIERDO	299.88	199.21
	CENTRAL	683.90	505.00
	DERECHO	299.88	199.21
8	IZQUIERDO	312.04	189.89
	CENTRAL	1031.68	664.21
	DERECHO	312.04	189.89
9	IZQUIERDO	395.90	220.68
	CENTRAL	1124.88	644.69
	DERECHO	395.90	220.68
		Σ	7725.09

Tabla 4-6 Tensiones en la dirección X,Y,Z cables (1 al 9)

			TENSION(ton)
CABLE	UBICACION	TOTAL(ton)	Z
10	IZQUIERDO	395.90	220.68
	CENTRAL	1032.00	591.46
	DERECHO	395.90	220.68
11	IZQUIERDO	312.04	189.89
	CENTRAL	1031.68	664.21
	DERECHO	312.04	189.89
12	IZQUIERDO	299.88	199.21
	CENTRAL	683.90	505.00
	DERECHO	299.88	199.21
13	IZQUIERDO	240.02	163.29
	CENTRAL	1080.47	921.10
	DERECHO	240.02	163.29
14	IZQUIERDO	299.97	210.90
	CENTRAL	-	-
	DERECHO	299.97	210.90
15	IZQUIERDO	228.00	155.11
	CENTRAL	1092.42	931.28
	DERECHO	208.00	141.50
16	IZQUIERDO	288.08	191.37
	CENTRAL	492.00	363.30
	DERECHO	288.08	191.37
17	IZQUIERDO	299.97	182.55
	CENTRAL	803.88	517.55
	DERECHO	299.86	182.48
18	IZQUIERDO	444.19	247.59
	CENTRAL	863.60	494.95
	DERECHO	-	-
		Σ	8248.74



#### 4.2.2 Verificación del peso del tablero con la componente vertical de la tensión

Para determinar el peso del tablero se calcula el área transversal del mismo y se multiplica por el largo, se desprecia el peso del acero, aceras, pasamanos y se asume una densidad típica del concreto.

Tabla 4-7 Peso del tablero

Área tablero m <sup>2</sup>	Peso concreto (ton/m3)	Longitud(m)	Total peso tablero (ton)
30.70	2.40	213.00	15693.84

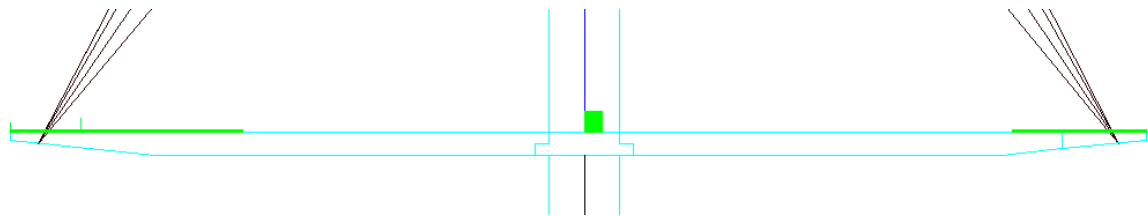


Ilustración 4-4 Sección del tablero, corte b'-b puente 4 sur

Del numeral anterior se tiene la componente vertical de los tirantes la cual nos permite conocer la magnitud de la carga muerta que están soportando

Tabla 4-8 Tensión total cables

Tensión cable 1-9 (ton)	Tensión cable 10-18 (ton)	Total tensión cables(ton)
7725.09	8248.74	15973.84

Con lo que se verifica que los cables están cargando en su totalidad la carga muerta del tablero.

### 4.3 MONITOREO

La empresa Inteinsa ha prestado el servicio de monitoreo de los cables del puente desde su proceso constructivo. La empresa ha recolectado los datos de las tensiones de 12 cables, en los cuales se puede observar (ver Tabla 4-9) que las variaciones de la tensión a lo largo del tiempo han sido mínimas con lo cual indica que las tensiones se han mantenido dentro de las especificaciones admisibles durante la etapa de diseño.

Tabla 4-9 Lecturas de carga recolectadas de los 12 sensores, tensiones máximas y mínimas registradas.

Tensión tirantes								
Tirante No.	Ubicación	Longitud	No. torones	Min (ton)	Max (ton)	$\Delta$ tensión (ton)	Final (ton)	Final por No. torones
2	Derecho	50.72	27	8.29	8.37	0.08	8.37	226.20
3	Izquierdo	40.06	26	7.18	7.35	0.16	7.35	191.22
	Central	36.26	48	8.32	8.63	0.30	8.38	402.33
6	Izquierdo	30.56	22	5.87	6.22	0.34	6.22	136.86
	Derecho	32.59	22	6.99	7.24	0.25	7.24	159.41
8	Central	46.75	104	8.44	8.66	0.22	8.55	889.59
10	Izquierdo	61.78	37	8.43	8.59	0.16	8.59	318.13
11	Central	47.03	104	6.66	6.83	0.17	6.72	699.04
	Derecho	50.73	29	9.00	9.22	0.22	9.22	267.60
12	Izquierdo	41.4	28	9.73	9.90	0.16	9.90	277.22
16	Izquierdo	41.22	26	6.636	6.721	0.084	6.693	174.00
17	Derecho	52.33	29	8.642	10.139	1.497	10.14 7	294.25

En las siguientes gráficas se evidencia la variación con respecto al tiempo de la carga de los tirantes desde el 9 de febrero de 2011 hasta el 20 de marzo de 2013. Durante este tiempo se percibe un incremento en su mayoría gradual de la carga pero se presentan algunos saltos del orden de dos toneladas.

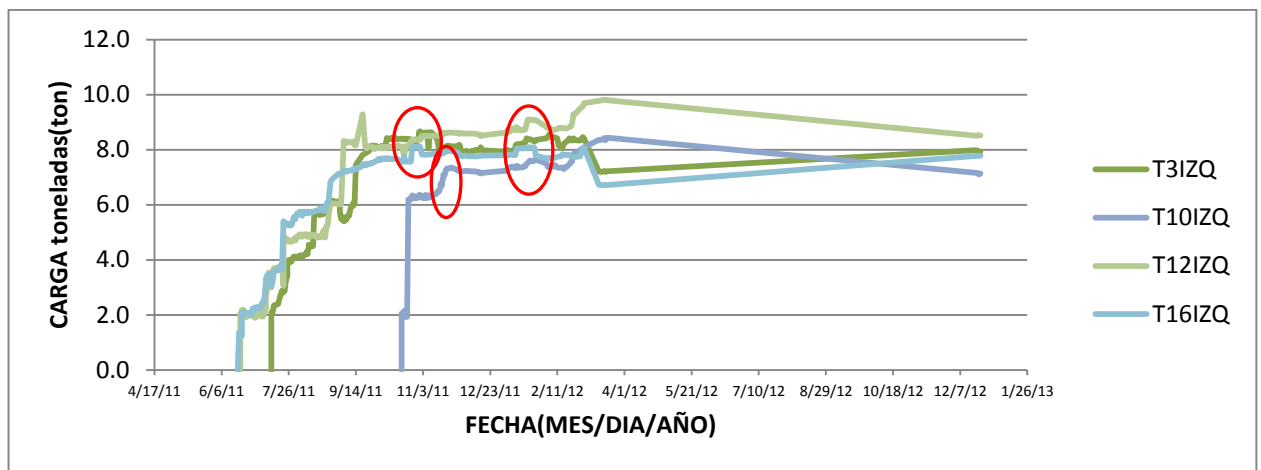


Ilustración 4-5 Carga vs tiempo de tirantes izquierdos que tienen sensor (Inteinsa, 2011)

De las celdas de la Ilustración 4-5, se presentaron incrementos de carga principalmente sobre el tirante 12 izquierdo y 10 izquierdo de hasta 1.6 Ton con respecto a los otros tirantes. El resto de las celdas presenta incrementos pequeños entre ellos.

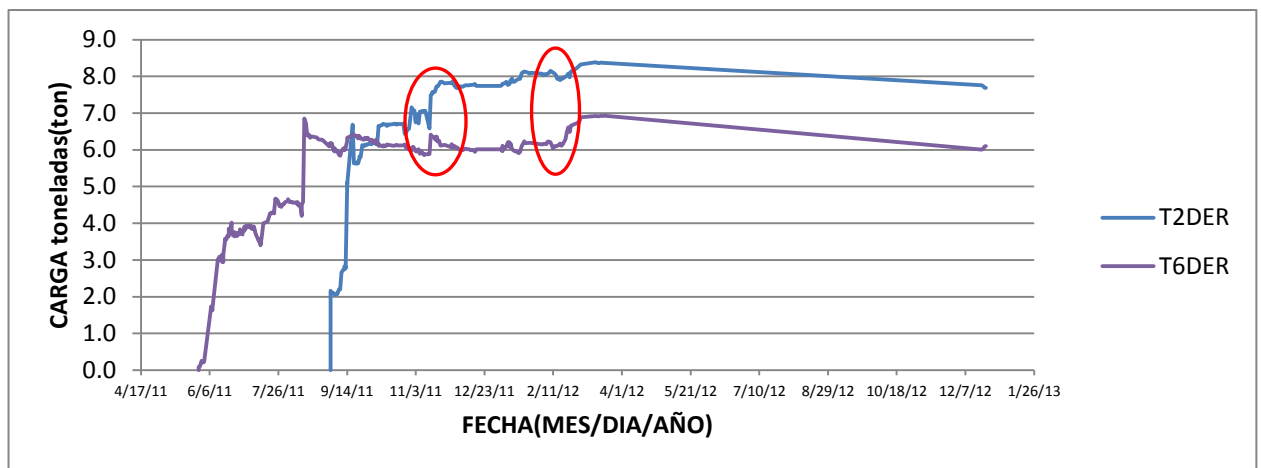


Ilustración 4-6 Tensión del tirante 2 derecho vs tirante 6 derecho (Inteinsa, 2011)

En la Ilustración 4-6 se puede observar en las tensiones de los tirantes 6 y 2 que a menor distancia del tablero (tirante 6) se tiene menor tensión y a mayor distancia (tirante 2) se tiene mayor tensión.

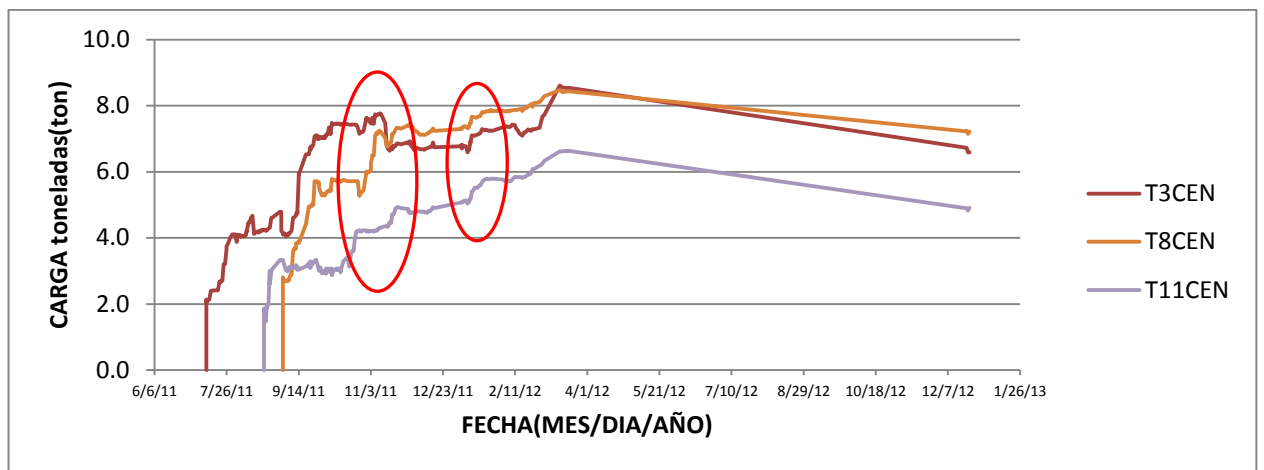


Ilustración 4-7 Carga vs tiempo de tirantes 3,8 y 11 central (Inteinsa, 2011)

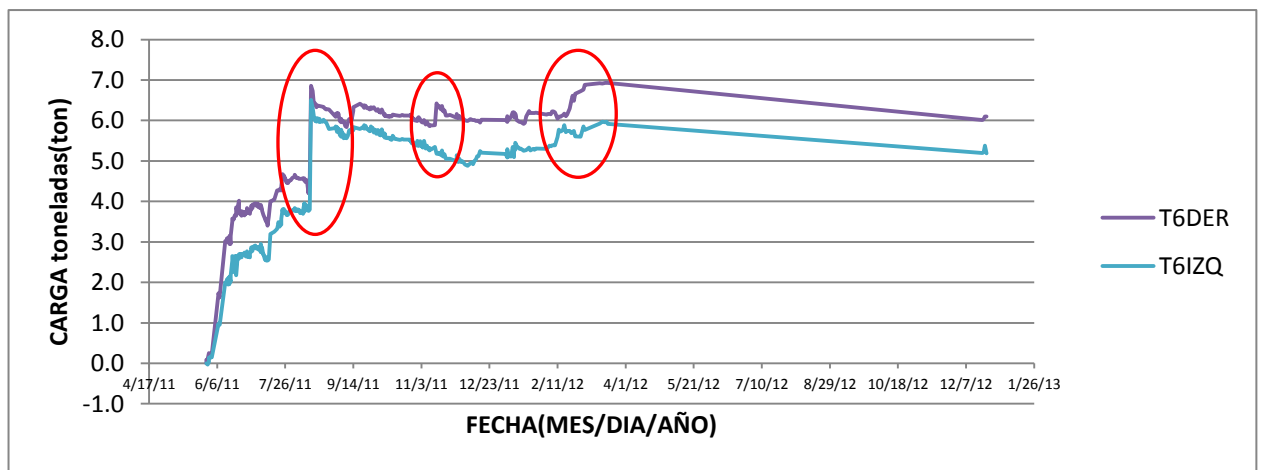


Ilustración 4-8 Carga vs tiempo tirante 6 derecho y tirante 6 izquierdo

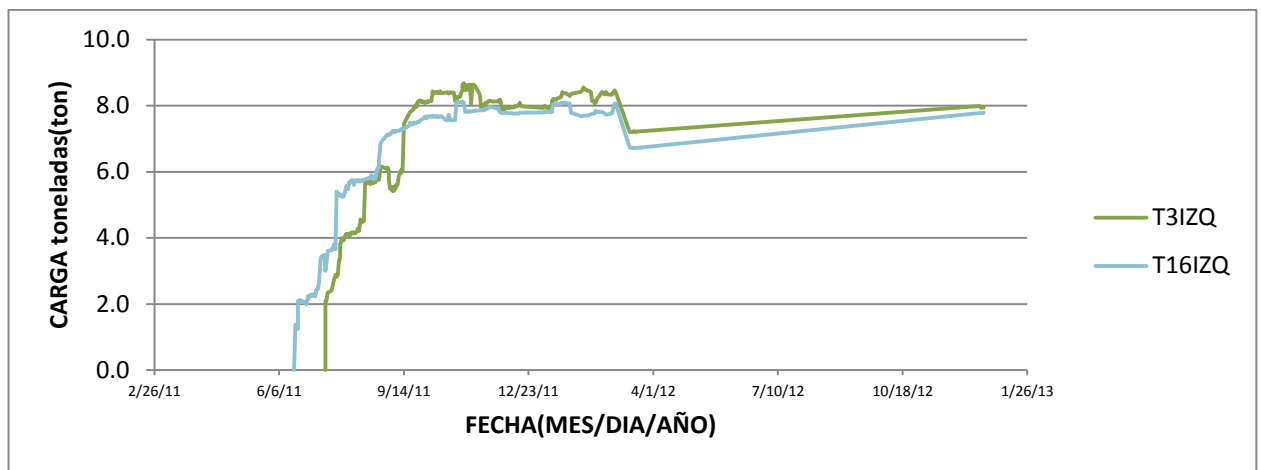


Ilustración 4-9 Carga vs tiempo comparación tirante 3 derecho con tirante 3 izquierdo

#### 4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS MEDICIONES

Para el estudio del puente, se identificaron sus propiedades dinámicas (periodos, frecuencias naturales), mediante mediciones de vibración. Para realizar el estudio el puente se instrumentó con diferentes instrumentos de medición como acelerómetros, amplificadores y tarjeta de adquisición de datos. Los sensores procesan 2000 datos por segundos con una frecuencia entre 0 a 40 Hz que es el rango de interés.

Para el análisis de los cables se utilizaron las siguientes propiedades que se muestran en las tablas Tabla 4-10, Tabla 4-11, Tabla 4-12, Tabla 4-13 y Tabla 4-14.

Tabla 4-10 Propiedad del tirante 3 Izquierdo (Emcocables, 2014)

Cable 3 izquierdo	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Número de torones	26	Un	26	Un
Área del torón	1.4	cm <sup>2</sup>	0.00014	m <sup>2</sup>
Peso de un torón	0.001	Ton-f/m	1	kg/m
Área total	36.4	cm <sup>2</sup>	0.00364	m <sup>2</sup>
Área del ducto	29.7722	cm <sup>2</sup>	29.7722	cm <sup>2</sup>
Peso del ducto	0.0029	Ton-f/m	2.9	kg/m
Peso por unidad de longitud	0.026	Ton-f/m	26	kg/m
Módulo de elasticidad	20400000	Ton-f/m <sup>2</sup>	204000000000	Pa
Cuerda	40.06	m	40.06	m

Tabla 4-11 Propiedad del tirante 6 Izquierdo (Emcocables, 2014)

Cable 6 izquierdo	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Número de torones	22	Un	22	Un
Área del torón	1.4	cm <sup>2</sup>	0.00014	m <sup>2</sup>
Peso de un torón	0.001	Ton-f/m	1	kg/m
Área total	30.8	cm <sup>2</sup>	0.00308	m <sup>2</sup>
Área del ducto	29.7722	cm <sup>2</sup>	29.7722	cm <sup>2</sup>
Peso del ducto	0.0029	Ton-f/m	2.9	kg/m
Peso por unidad de longitud	0.022	Ton-f/m	22	kg/m
Módulo de elasticidad	20400000	Ton-f/m <sup>2</sup>	204000000000	Pa
Cuerda	30.56	M	30.56	M

Tabla 4-12 Propiedad del tirante 10 Izquierdo (Emcocables, 2014)

Cable 10 izquierdo	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Número de torones	37	Un	37	Un
Área del torón	1.4	cm <sup>2</sup>	0.00014	m <sup>2</sup>
Peso de un torón	0.001	Ton-f/m	1	Ton-f/m
Área total	51.8	cm <sup>2</sup>	0.00518	cm <sup>2</sup>
Área del ducto	29.7722	cm <sup>2</sup>	29.7722	cm <sup>2</sup>
Peso del ducto	0.0029	Ton-f/m	2.9	kg/m
Peso por unidad de longitud	0.037	Ton-f/m	37	kg/m
Módulo de elasticidad	20400000	Ton-f/m <sup>2</sup>	204000000000	Pa
Cuerda	61.78	m	61.78	m

Tabla 4-13 Propiedad del tirante 12 Izquierdo (Emcocables, 2014)

Cable 12 izquierdo	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Número de torones	28	Un	28	Un
Área del torón	1.4	cm <sup>2</sup>	0.00014	m <sup>2</sup>
Peso de un torón	0.001	Ton-f/m	1	kg/m
Área total	39.2000	cm <sup>2</sup>	0.00392	m <sup>2</sup>
Área del ducto	29.7722	cm <sup>2</sup>	29.7722	cm <sup>2</sup>
Peso del ducto	0.0029	Ton-f/m	2.9	kg/m
Peso por unidad de longitud	0.0280	Ton-f/m	28	kg/m
Módulo de elasticidad	20400000	Ton-f/m <sup>2</sup>	204000000000	Pa
Cuerda	41.4	m	41.4	m

Tabla 4-14 Propiedad del tirante 16 Izquierdo (Emcocables, 2014)

Cable 16 izquierdo	Valor	Unidades	Valor	Unidades
Número de torones	26	Un	26	Un
Área del torón	1.4	cm <sup>2</sup>	0.00014	m <sup>2</sup>
Peso de un torón	0.001	Ton-f/m	1	kg/m
Área total	36.4	cm <sup>2</sup>	0.00364	m <sup>2</sup>
Área del ducto	29.7722	cm <sup>2</sup>	29.7722	cm <sup>2</sup>
Peso del ducto	0.0029	Ton-f/m	2.9	kg/m
Peso por unidad de longitud	0.026	Ton-f/m	26	kg/m
Módulo de elasticidad	20400000	Ton-f/m <sup>2</sup>	204000000000	Pa
Cuerda	41.22	m	41.22	m

Durante el proceso de las mediciones el puente no fue cerrado al tráfico, la prueba de campo se ejecutó el 17 de julio de 2014. La excitación sólo se produjo por el tráfico al cruzar el puente. En algunas ocasiones el tráfico fue pesado (se detalla en cada ilustración). En otras ocasiones, el tráfico era muy ligero.

La excitación fue proporcionada agitando el cable manualmente. Las señales se registraron durante 8 minutos. El puente se instrumentó de tal forma que se tomaran señales en dos ejes.

Para determinar las propiedades dinámicas del puente, se aplicó a cada señal obtenida de los acelerómetros, un procesamiento numérico, empleando el software MatLab®, el cual consta de los siguiente pasos

- Corrección de línea base de los registros
- Aplicación de un filtro Pasabanda con el propósito de eliminar ruido lo mayor posible y ajustar las frecuencias en un rango parecido a las frecuencias del puente. Los registros se ajustaron para una frecuencia baja de 0.1Hz y una frecuencia alta de 40Hz
- Se realizó un análisis para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia utilizando la función Pwelch, esta función estima la densidad de potencia espectral (PSD), la cual permite obtener el espectro de amplitud de cada registro.

Este análisis de señales permitió determinar las frecuencias naturales del puente. Esto para las medición ejecutada con tráfico bajo. Los resultados principales de este análisis se presentan en la Ilustración 4-10, Ilustración 4-11, Ilustración 4-12, Ilustración 4-13 y Ilustración 4-14. Las mediciones de las vibraciones de la estructura sin tráfico, permitieron identificar con mayor certeza sus frecuencias predominantes.

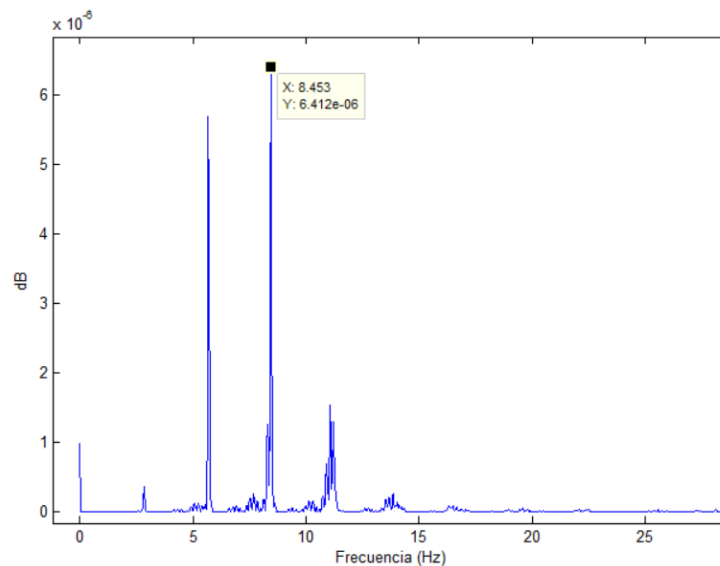


Ilustración 4-10 Filtrado de la señal del tirante 3 izquierdo

Durante la medición del cable 12 izquierdo hubo tráfico Alto, pasaron dos volquetas, carros de argos cargado, una moto cerca de los sensores y una grúa.



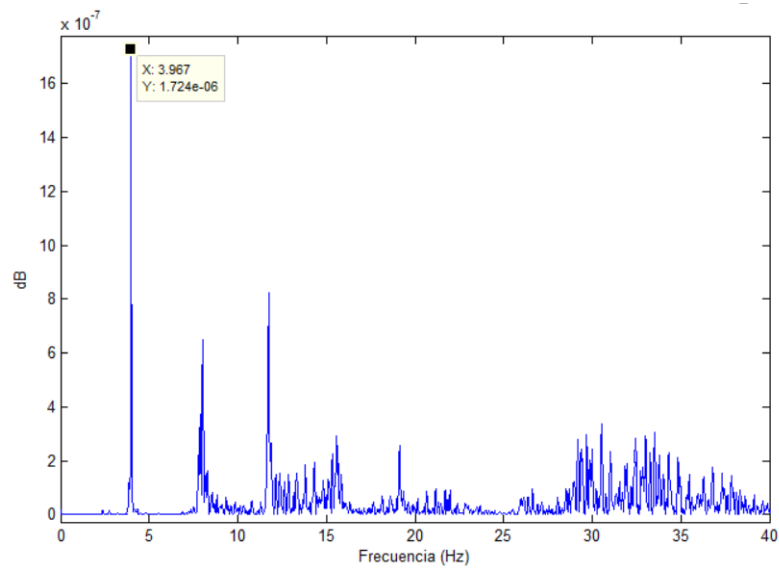


Ilustración 4-11 Filtrado de la señal del tirante 6 izquierdo

Durante la medición del cable 12 izquierdo hubo tráfico bajo.

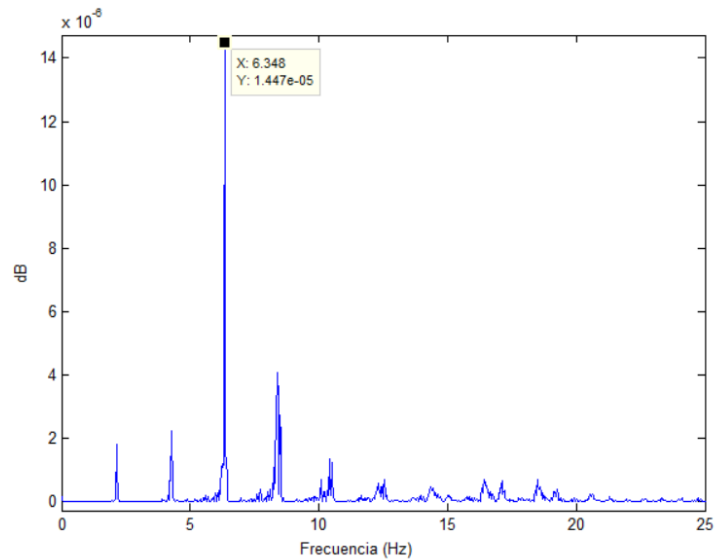


Ilustración 4-12 Filtrado de la señal del tirante 10 izquierdo

Durante la medición del cable 10 izquierdo hubo trafico bajo, lo cual permitió obtener una señal con baja perturbación.

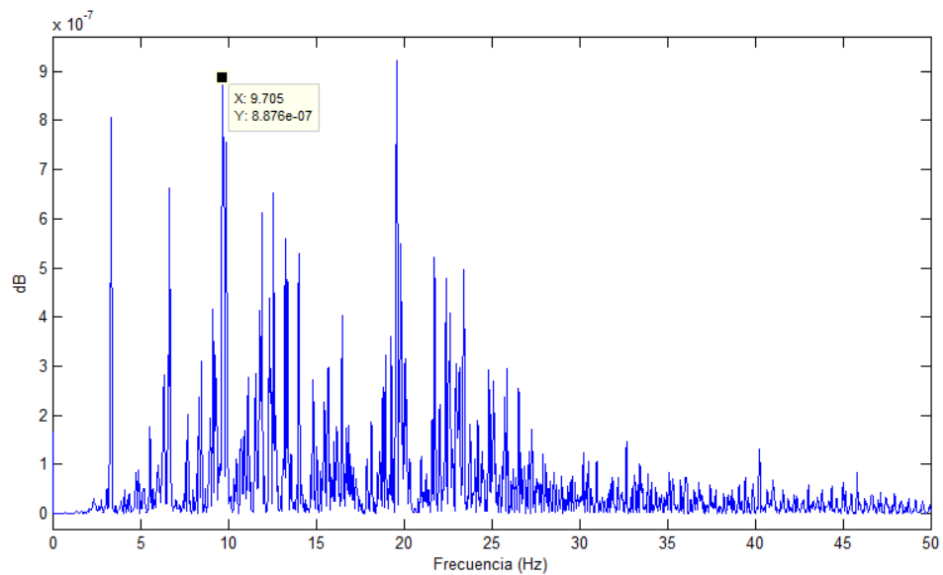


Ilustración 4-13 Filtrado de la señal del tirante 12 izquierdo

Durante la medición del cable 12 izquierdo hubo trafico bajo, pasaron dos camiones y una volqueta.

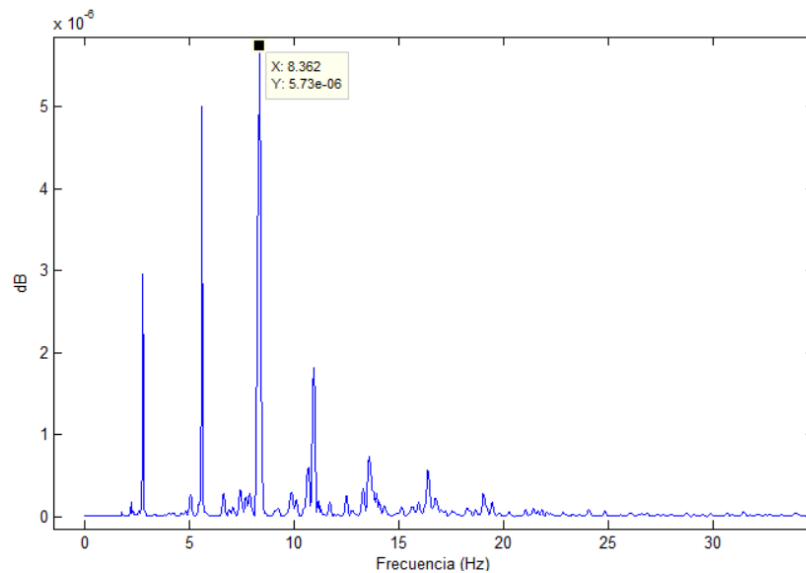


Ilustración 4-14 Filtrado de la señal del tirante 16 izquierdo

Las frecuencias naturales de los cables se determinaron mediante la identificación de los picos de la densidad espectral en las historias de tiempo de aceleración registradas. Los parámetros espectrales incluyen 50% de superposición, y el punto de longitud de la

ventana de datos 65.536. Donde las señales recogidas por los acelerómetros instalados sobre los diferentes cables como se muestra en las anteriores ilustraciones. Los picos se muestran claramente y la frecuencia fundamental del cable corresponde al primer pico.

#### 4.5 DETERMINACIÓN DE TENSIONES MEDIANTE FÓRMULAS EMPÍRICAS

Los resultados obtenidos en ambas direcciones de medición no presentan variación, con excepción de los cables más largos donde se percibe una leve diferencia, las frecuencias de los cables más largos son más bajas y las frecuencias de los cables más cortos son más altas como se observa en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15 Frecuencia natural de los cables monitoreados

	Longitud (m)	Frecuencia natural (Hz)
<b>Cable6-Izquierdo</b>	30.56	3.97
<b>Cable3-Izquierdo</b>	40.06	2.84
<b>Cable16-Izquierdo</b>	41.22	2.81
<b>Cable12-Izquierdo</b>	41.4	3.35
<b>Cable10-Izquierdo</b>	61.68	2.14

A partir de las frecuencias naturales de cada cable se pueden determinar las tensiones atreves de fórmulas empíricas ya antes mencionadas en el numeral 2.3.7 más atrás. Con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 4-16 y

Tabla 4-17.

Tabla 4-16 Tensiones obtenidos del procesamiento de datos en la dirección 1

Dirección 1	Tensión		
	(1 torón) N	(1 torón) ton	Cable (ton)
<b>Cable3-Izquierdo</b>	51701.92	5.17	134.42
<b>Cable6-Izquierdo</b>	58788.33	5.88	129.33
<b>Cable10-Izquierdo</b>	69430.65	6.94	256.89
<b>Cable12-Izquierdo</b>	76939.66	7.69	215.43
<b>Cable16-Izquierdo</b>	53588.32	5.36	139.33

Tabla 4-17 Tensiones obtenidos del procesamiento de datos en la dirección 2

Dirección 2	Tensión		
	(1 toron) N	(1 toron) ton	Cable (ton)
<b>Cable3-Izquierdo</b>	51701.92	5.17	134.42
<b>Cable6-Izquierdo</b>	57902.53	5.79	127.39
<b>Cable10-Izquierdo</b>	69655.96	6.97	257.73
<b>Cable12-Izquierdo</b>	75841.19	7.58	212.36
<b>Cable16-Izquierdo</b>	53588.32	5.36	139.33

Como se menciona anteriormente las diferencias en ambas direcciones son mínimas por lo tanto se tomara como parámetro de comparación los datos obtenidos en una solo dirección.

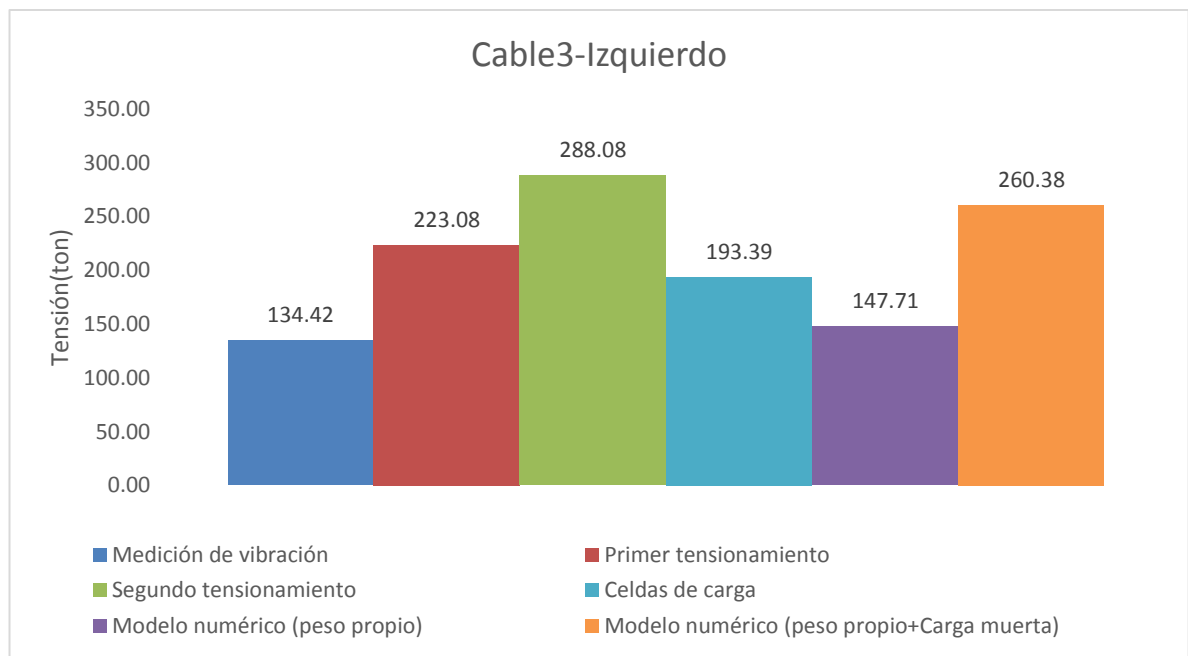


Ilustración 4-15 Resultados de la tensión del tirante 3 izquierdo.

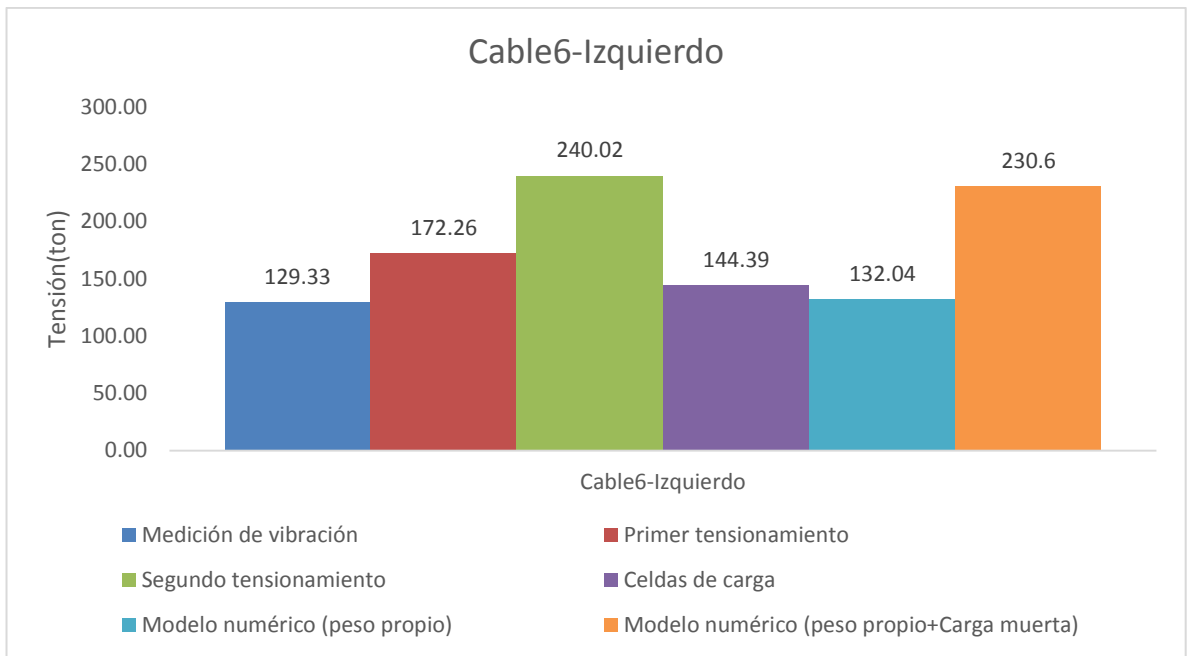


Ilustración 4-16 Resultados de la tensión del tirante 6 izquierdo.

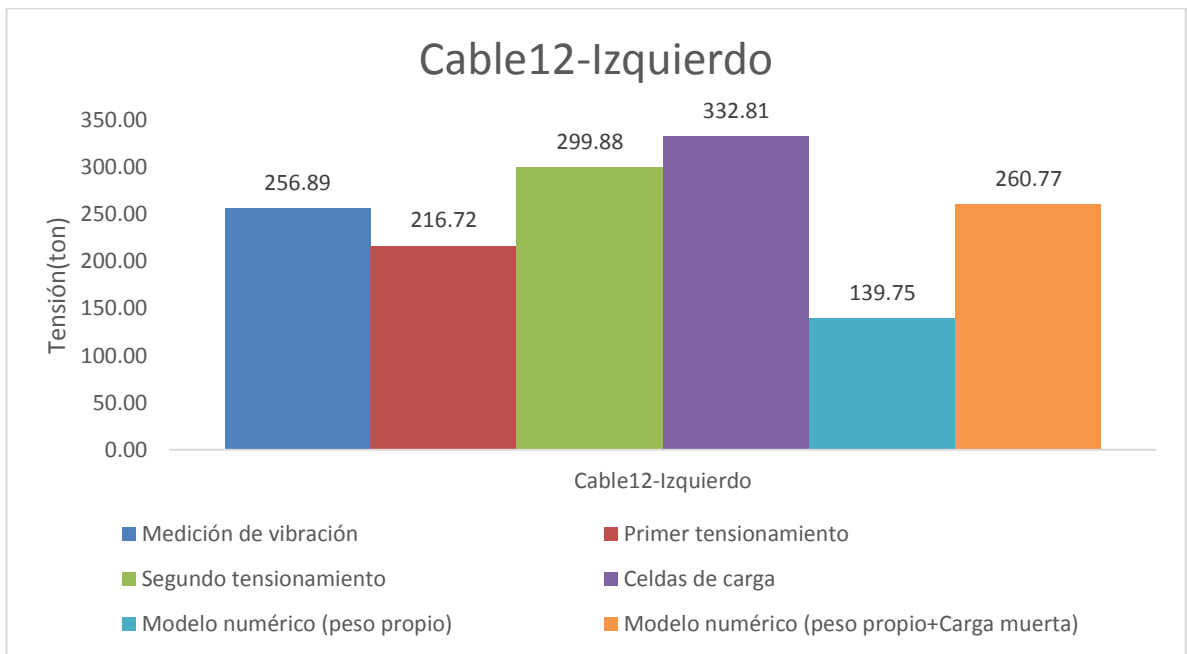


Ilustración 4-17 Resultados de la tensión del tirante 10 izquierdo.

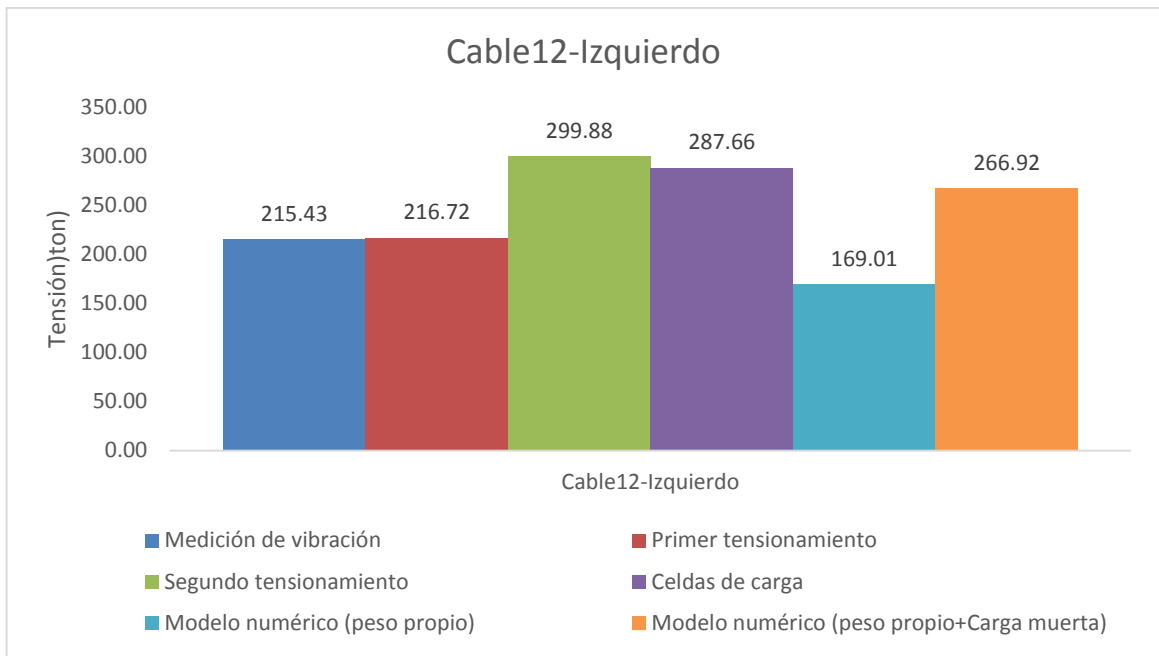


Ilustración 4-18 Resultados de la tensión del tirante 12 izquierdo.

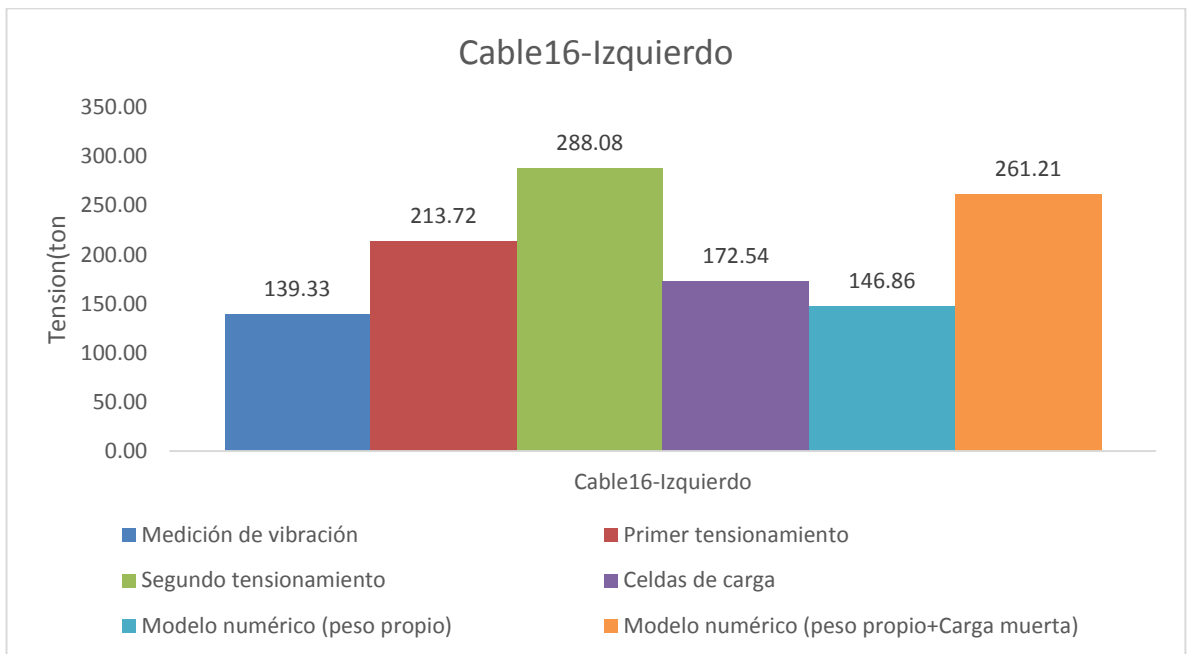


Ilustración 4-19 Resultados de la tensión del tirante 16 izquierdo.

## 4.6 MODELO NUMERICO

El modelo estructural del puente Gilberto Echeverri 4sur desarrollado en el programa SAP-2000 (Ilustración 4-20) por el ingeniero diseñador, con el cual se realizó el análisis de determinación de los parámetros iniciales de diseño.

En el modelo los cables y torres se modelaron como elementos tipo Frame, la losa se modelo como elemento finito tipo Shell. En el modelo se evaluaron las diversas fuerzas, deformaciones y tensiones, en diferentes elementos y se analizo el comportamiento debido a la variación en los cables.

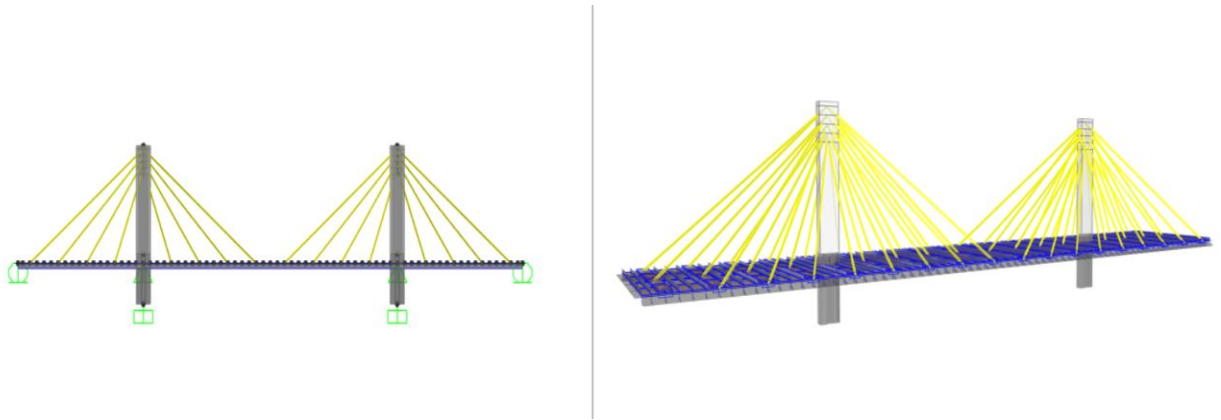


Ilustración 4-20 Modelo estructural del puente, desarrollado en SAP-2000

Analizado el modelo numérico modelado en la etapa de diseño en el software SAP 2000 se obtuvieron las siguientes tensiones como se muestra en la Tabla 4-18 y Tabla 4-19 .

Tabla 4-18 Tensión iniciales de diseño (Peso propio más carga muerta)  
Modelo numérico

TI: Tirante izquierdo ; TC: Tirante central ; TD: Tirante derecho					
	Tensión (ton)		Tensión (ton)		Tensión (ton)
TI-1	278.83	TC-1	775.57	TD-1	308.57
TI-2	306.73	TC-2	859.40	TD-2	308.83
TI-3	260.38	TC-3	505.94	TD-3	256.25
TI-4	234.05	TC-4	781.02	TD-4	232.23
TI-5	237.23	TC-5	721.43	TD-5	236.86
TI-6	230.60	TC-6	519.18	TD-6	234.61
TI-7	255.43	TC-7	843.85	TD-7	263.27
TI-8	294.52	TC-8	886.92	TD-8	285.94
TI-9	347.55	TC-9	799.77	TD-9	294.10
TI-10	260.77	TC-10	852.11	TD-10	315.06
TI-11	283.48	TC-11	531.21	TD-11	291.09
TI-12	266.92	TC-12	722.77	TD-12	262.68
TI-13	235.83	TC-13	774.53	TD-13	233.87
TI-14	238.11	TC-14	495.48	TD-14	230.76
TI-15	235.84	TC-15	864.96	TD-15	223.79
TI-16	261.21	TC-16	861.41	TD-16	267.01
TI-17	301.03			TD-17	387.93
TI-18	252.30				

Tabla 4-19 Tensión iniciales de diseño (Peso propio más carga muerta)  
Tensiones del modelo numérico (peso propio)

TI: Tirante izquierdo ; TC: Tirante central ; TD: Tirante derecho					
	Tensión (ton)		Tensión (ton)		Tensión (ton)
TI-1	162.51	TC-1	373.96	TD-1	176.25
TI-2	133.11	TC-2	442.98	TD-2	139.17
TI-3	147.71	TC-3	291.58	TD-3	151.34
TI-4	115.36	TC-4	338.63	TD-4	116.93
TI-5	153.85	TC-5	297.36	TD-5	154.35
TI-6	132.04	TC-6	415.38	TD-6	130.35
TI-7	176.49	TC-7	632.6	TD-7	170.06
TI-8	171.34	TC-8	482.24	TD-8	159.18
TI-9	174.53	TC-9	446.65	TD-9	152.04
TI-10	139.75	TC-10	613.87	TD-10	161.95
TI-11	153.92	TC-11	412.86	TD-11	165.4
TI-12	169.01	TC-12	301.5	TD-12	173.86
TI-13	131.7	TC-13	334.7	TD-13	130.63
TI-14	156.53	TC-14	292.1	TD-14	150.35
TI-15	116.55	TC-15	456.25	TD-15	112.81
TI-16	146.86	TC-16	405.88	TD-16	149.35
TI-17	129.33			TD-17	157.11
TI-18	151.71				



## 4.7 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS

Se presenta la distribución de esfuerzos en el tablero y las torres estimadas en la etapa de diseño y las distribuciones de esfuerzo debidas a las fuerzas reales. Esta distribución de esfuerzos corresponde al caso de carga de peso.

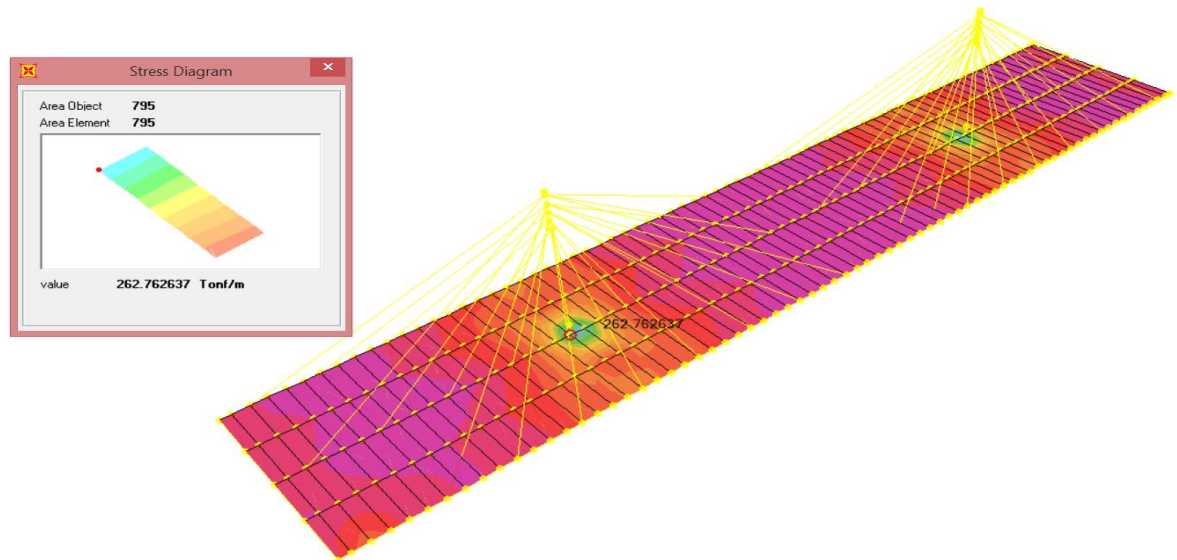


Ilustración 4-21 Esfuerzo máximo en el tablero debido al peso propio lado surorientado

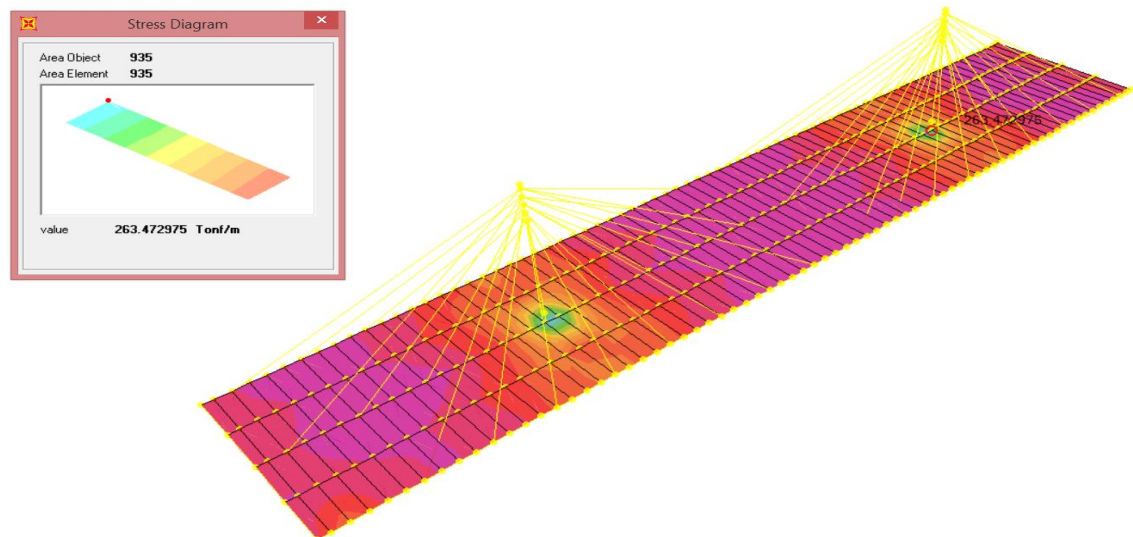


Ilustración 4-22 Esfuerzo máximo en el tablero debido al peso propio suroccidente

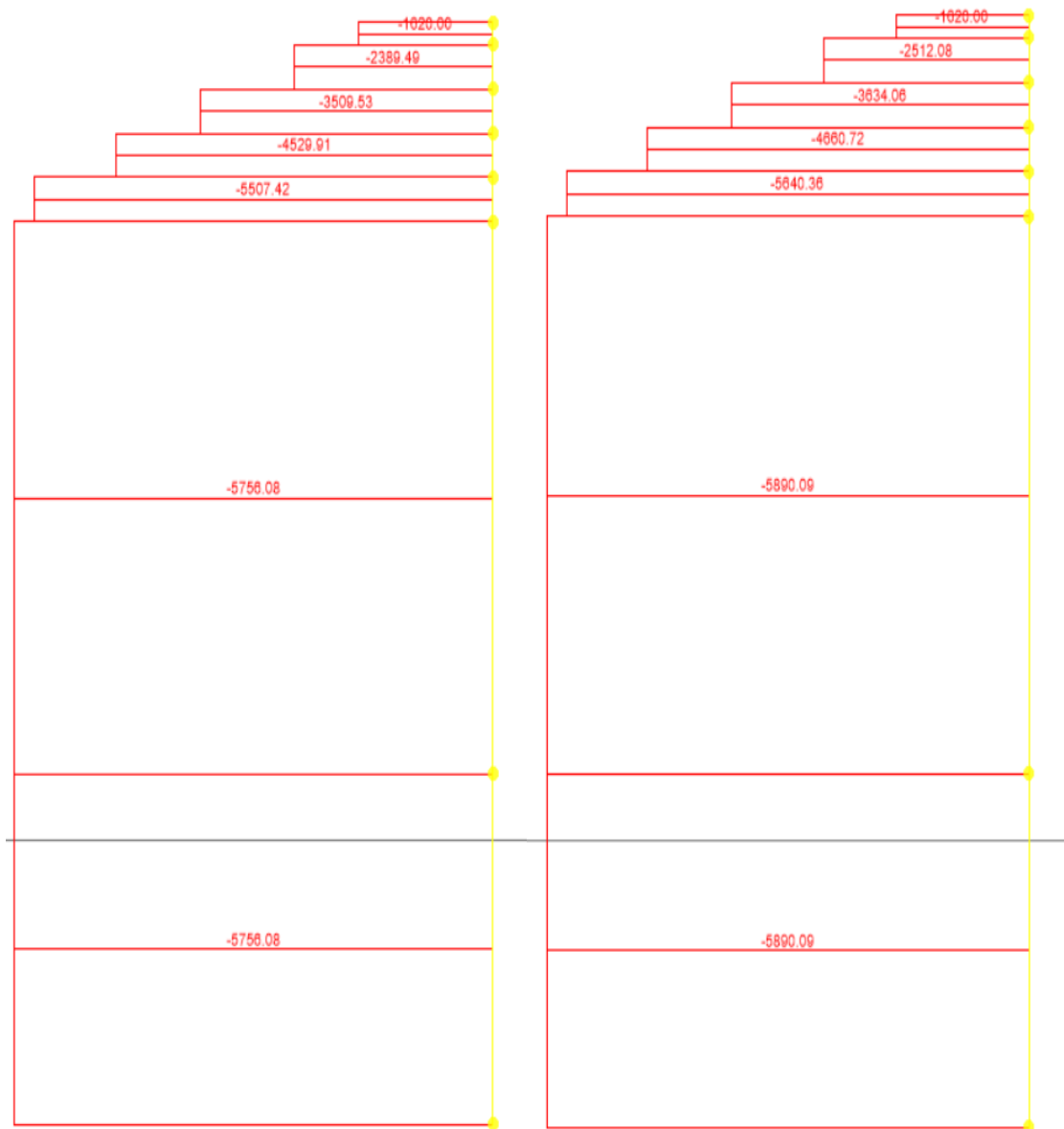


Ilustración 4-23 Carga axial en las torres debido a la carga muerta.

Debido a que no se instrumentó todo el puente, no se conocen las tensiones reales de todos los cables, por lo que mediante variación en las áreas de los tirantes se ajustó el modelo a las tensiones reales de los cables instrumentados.

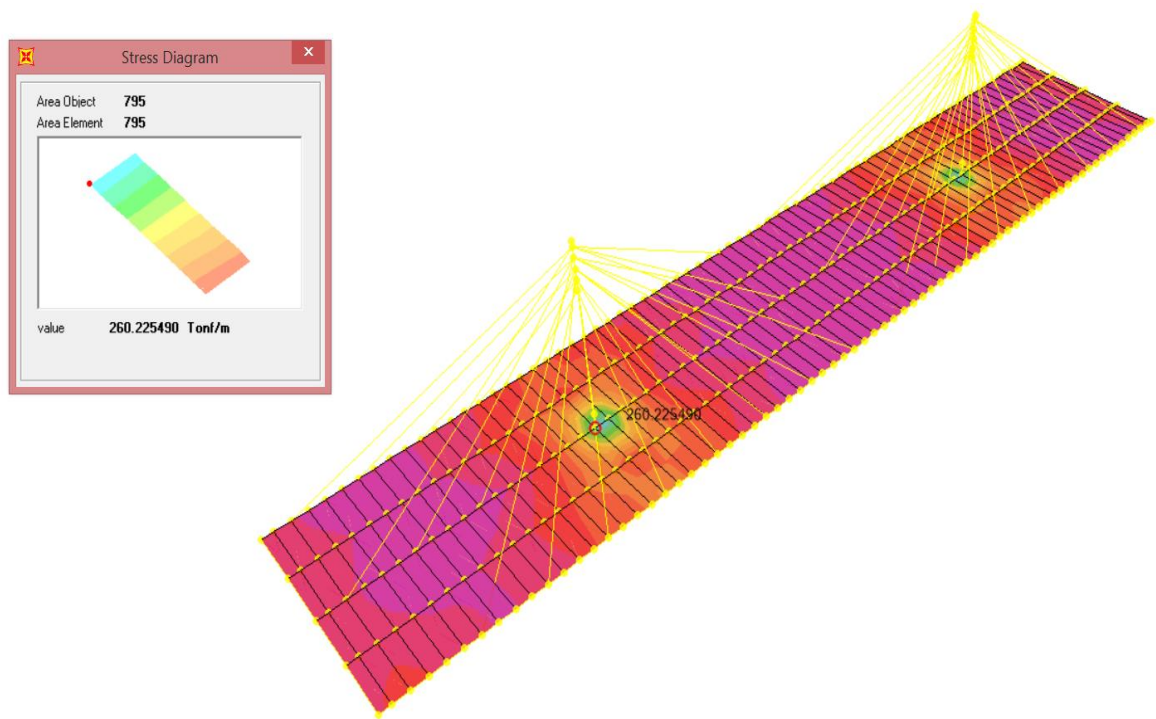


Ilustración 4-24 Esfuerzo máximo en el tablero debido a las fuerzas reales lado surorientado

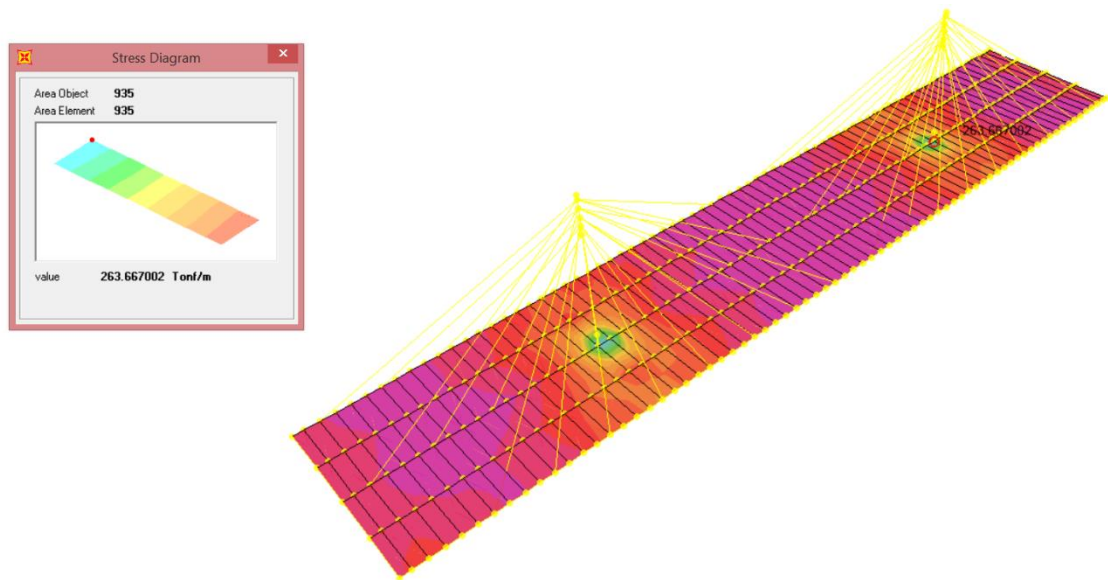


Ilustración 4-25 Esfuerzo máximo en el tablero debido a las fuerzas reales lado suroccidente

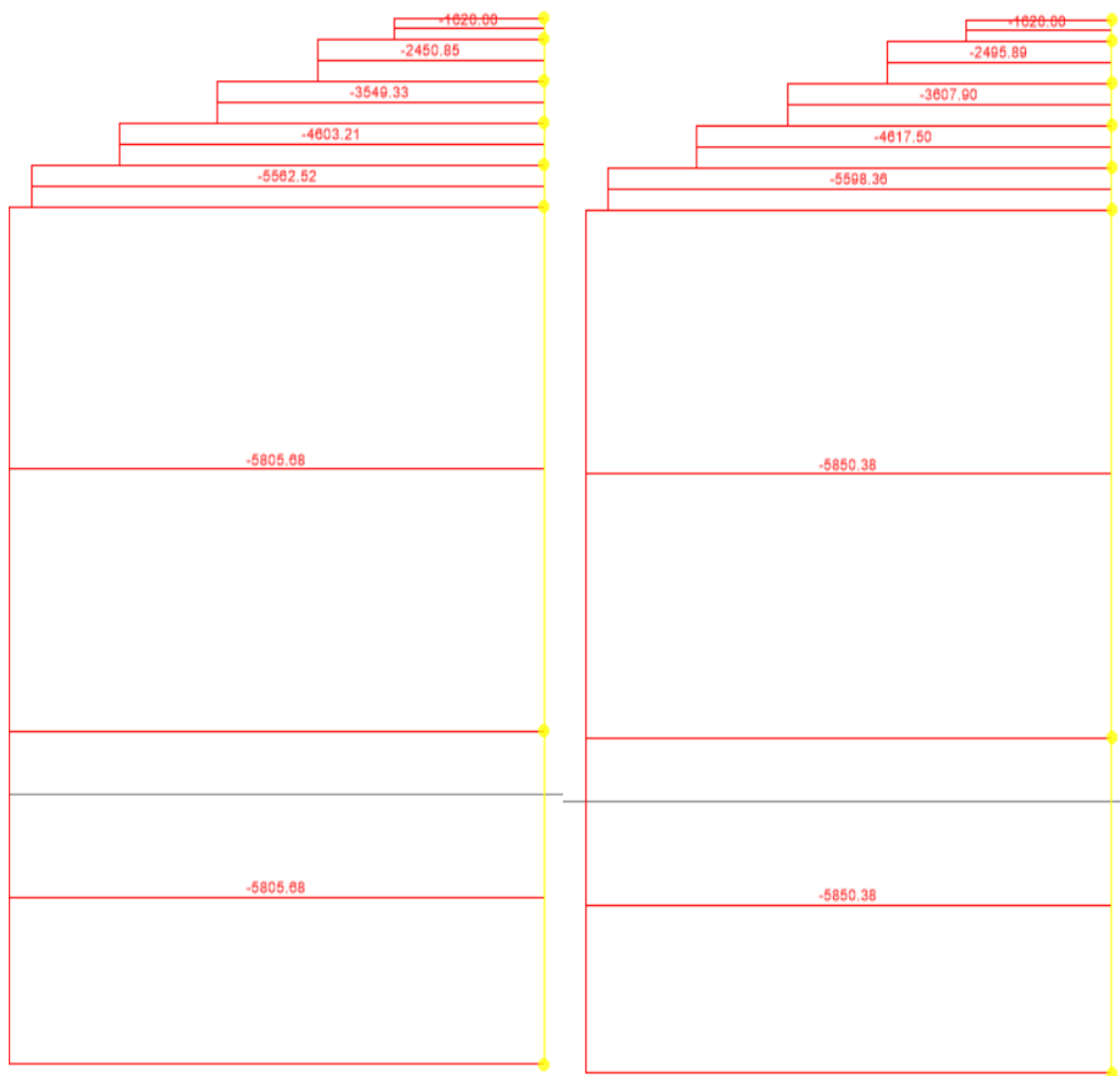


Ilustración 4-26 Carga axial en las torres debido a las fuerzas reales.

## 4.8 ANALISIS DE VARIABILIDAD

Se procedió a eliminar uno por uno de los tirantes del puente con el propósito de conocer cómo se distribuyen los esfuerzos del tirante eliminado en los demás tirantes y si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia última de los tirantes

Tabla 4-20 Resistencia última tirantes

Tirante	Resistencia(ton)
Cable 3 izquierdo	676
Cable 6 izquierdo	572
Cable 10 izquierdo	962
Cable 12 izquierdo	728
Cable 16 izquierdo	676

A continuación se presentan los gráficos de la variación de esfuerzos de los tirantes monitoreados.

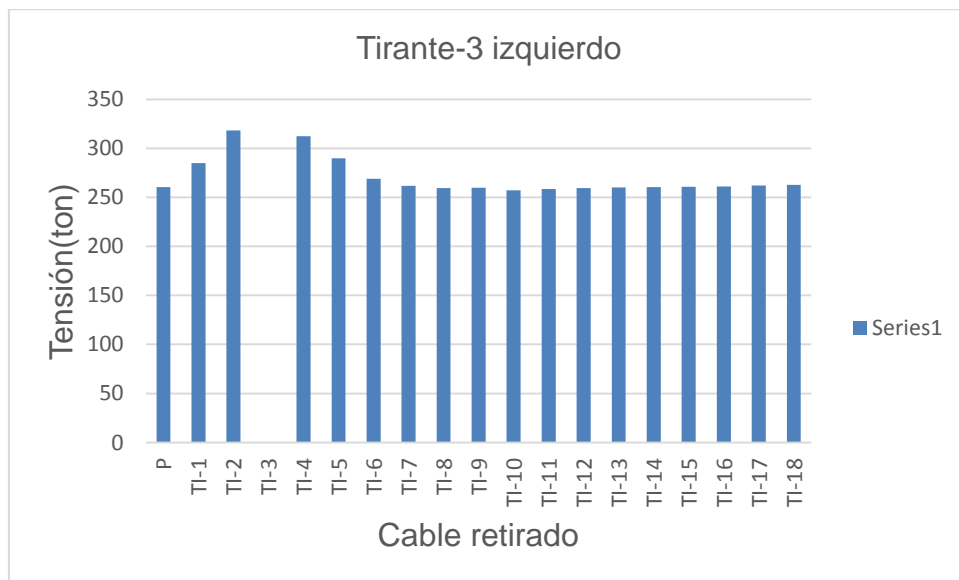


Ilustración 4-27 Análisis de variabilidad tirante 3 izquierdo eliminando tirantes izquierdos

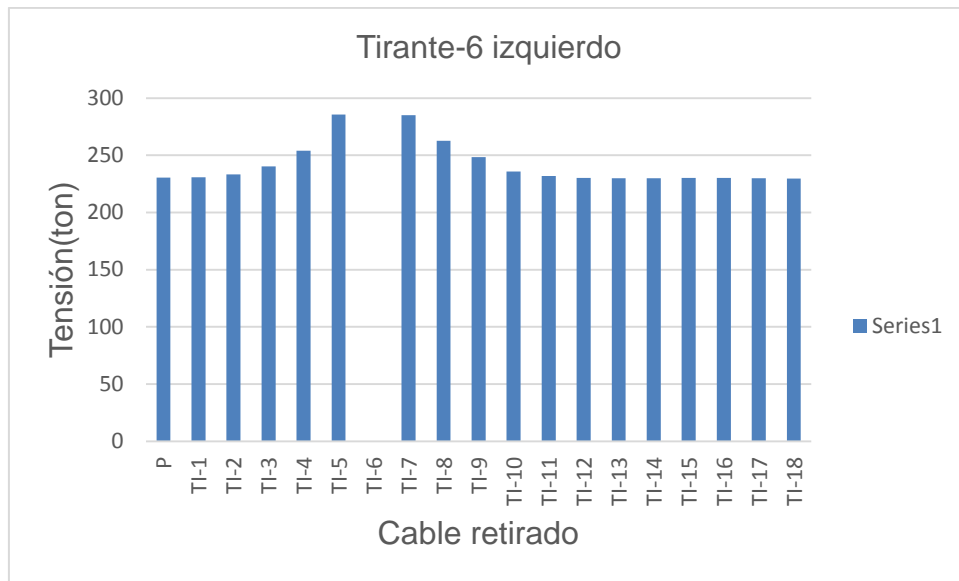


Ilustración 4-28 Análisis de variabilidad tirante 6 izquierdo eliminando tirantes izquierdos

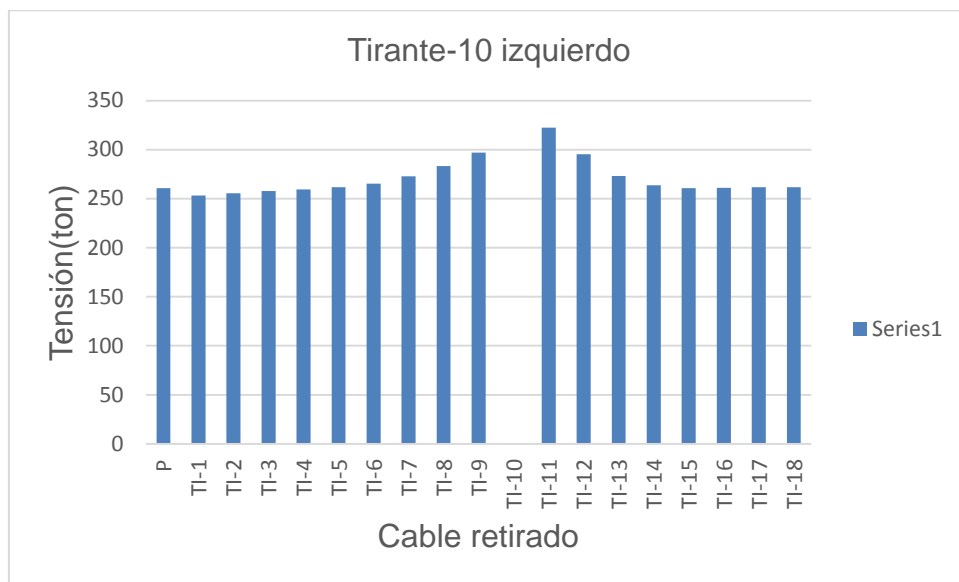


Ilustración 4-29 Análisis de variabilidad tirante 10 izquierdo eliminando tirantes izquierdos

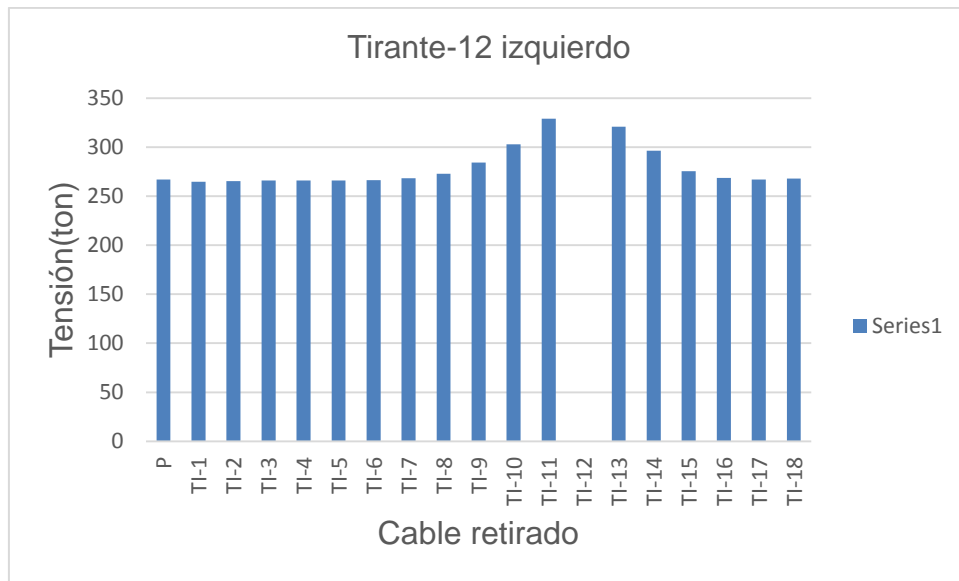


Ilustración 4-30 Análisis de variabilidad tirante 12 izquierdo eliminando tirantes izquierdos

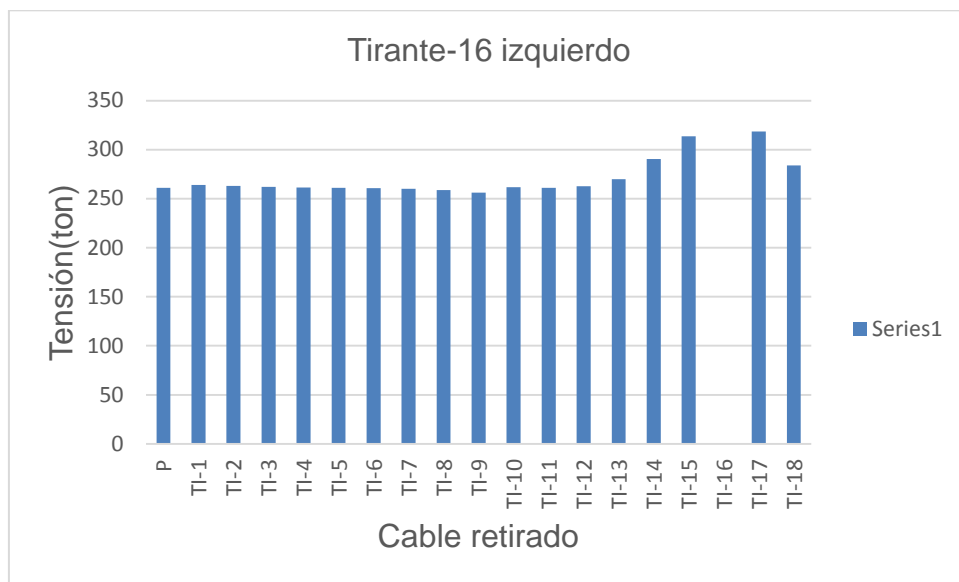


Ilustración 4-31 Análisis de variabilidad tirante 16 izquierdo eliminando tirantes izquierdos

Al eliminar uno por uno de los tirantes del lado izquierdo se obtuvo que ninguno de los cables monitoreados sobrepasa su resistencia última y el incremento en los esfuerzos es mínimo.

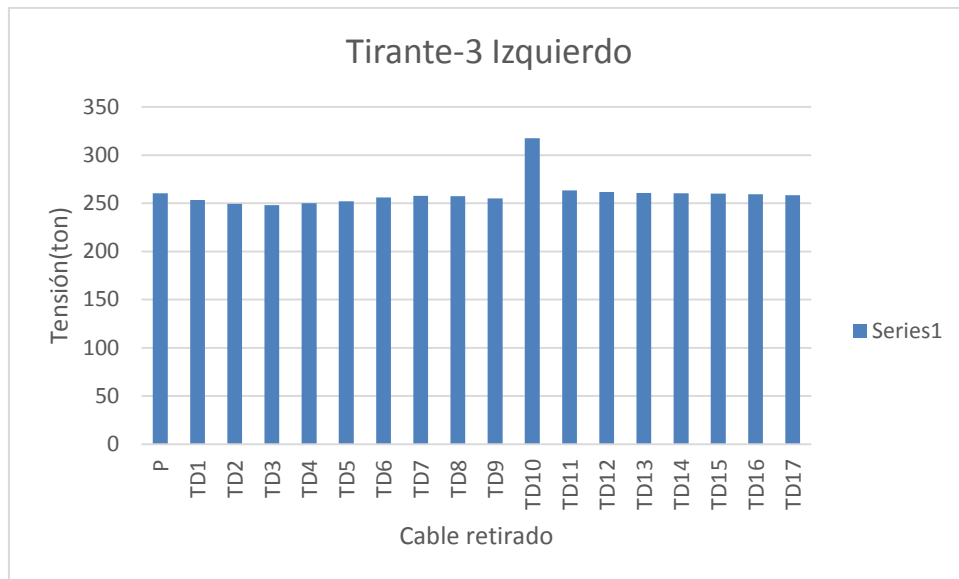


Ilustración 4-32 Análisis de variabilidad tirante 3 izquierdo eliminando tirantes derechos

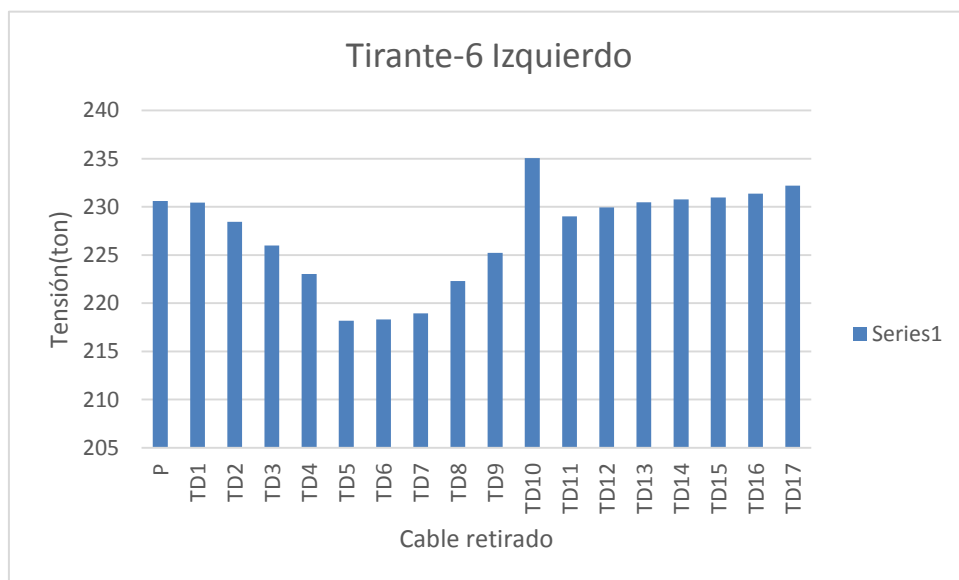


Ilustración 4-33 Análisis de variabilidad tirante 6 izquierdo eliminando tirantes derechos



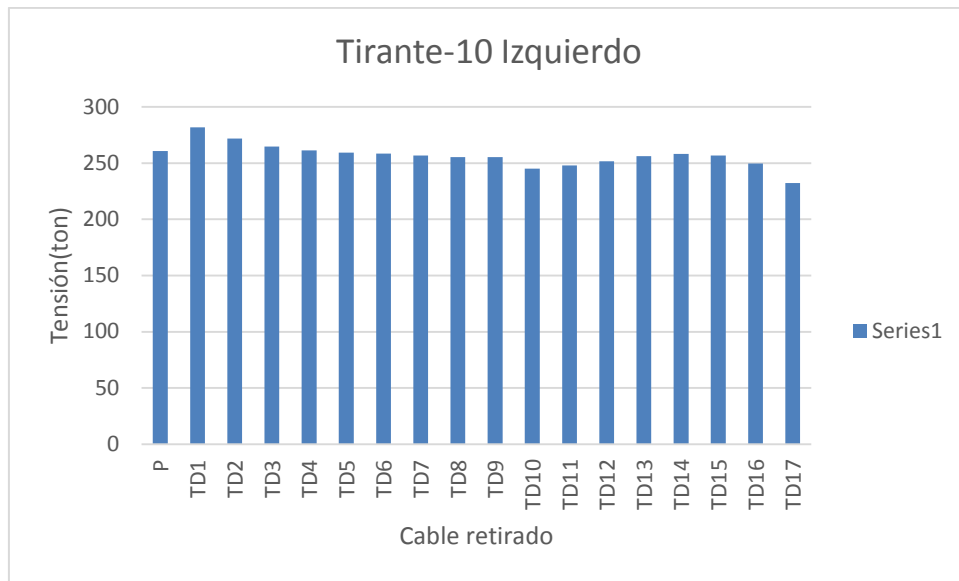


Ilustración 4-34 Análisis de variabilidad tirante 10 izquierdo eliminando tirantes derechos

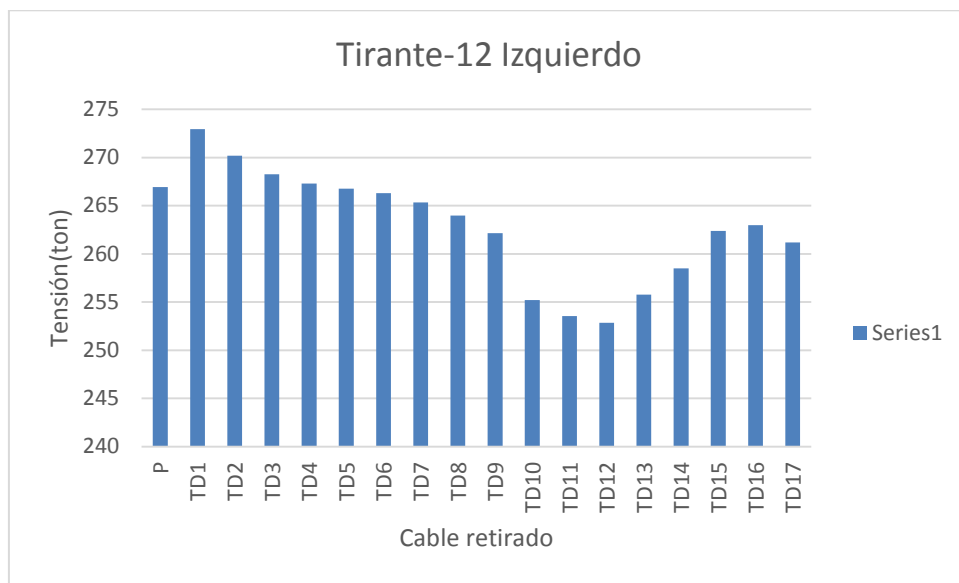


Ilustración 4-35 Análisis de variabilidad tirante 12 izquierdo eliminando tirantes derechos

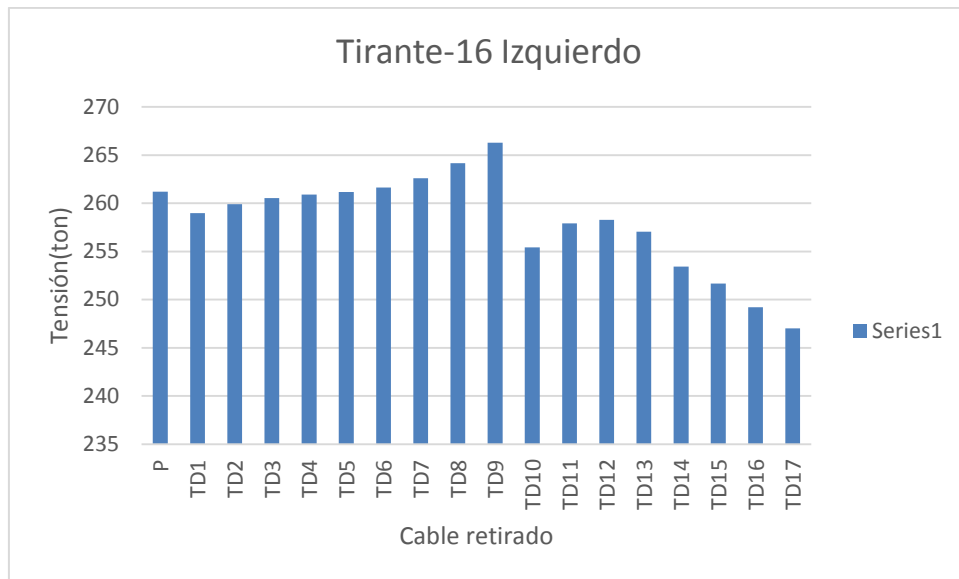


Ilustración 4-36 Análisis de variabilidad tirante 16 izquierdo eliminando tirantes derechos

Al eliminar uno por uno de los tirantes del lado izquierdo se obtuvo que ninguno de los cables monitoreados sobrepasa su resistencia última y el incremento en los esfuerzos es mínimo. Sin embargo al eliminar el tirante 9 derecho se presenta el mayor incremento en los esfuerzos, por lo que una falla en este cable sería más sensible que en los demás tirantes.

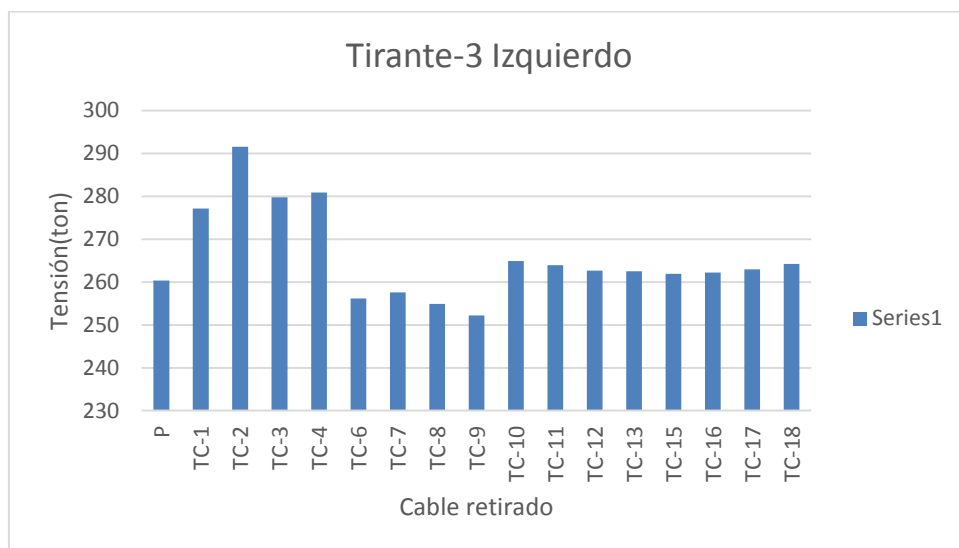


Ilustración 4-37 Análisis de variabilidad tirante 3 izquierdo eliminando tirantes centrales

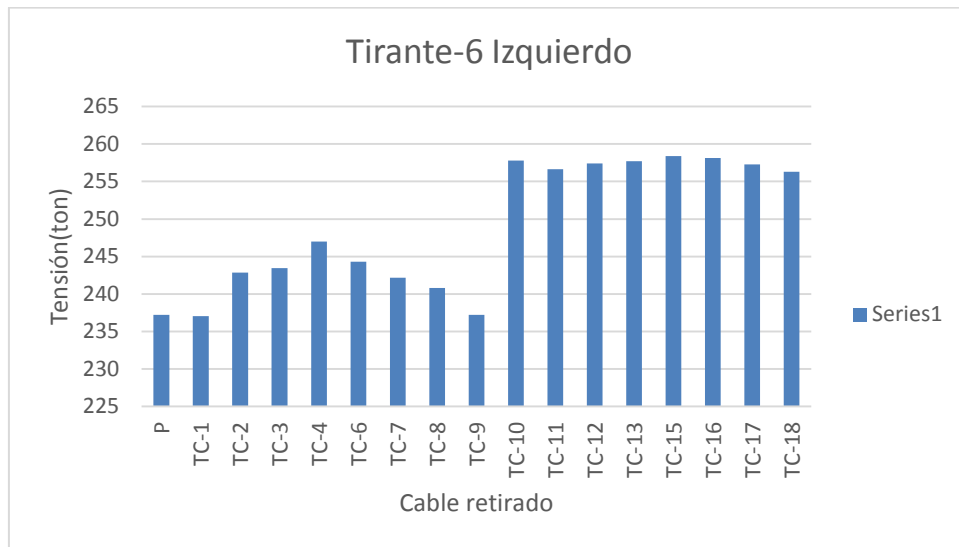


Ilustración 4-38 Análisis de variabilidad tirante 6 izquierdo eliminando tirantes centrales

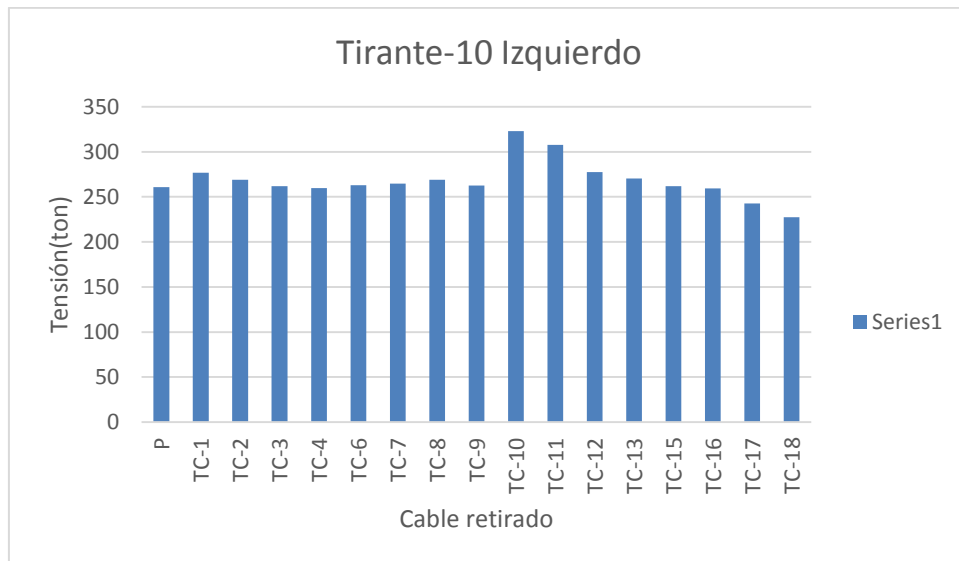


Ilustración 4-39 Análisis de variabilidad tirante 10 izquierdo eliminando tirantes centrales

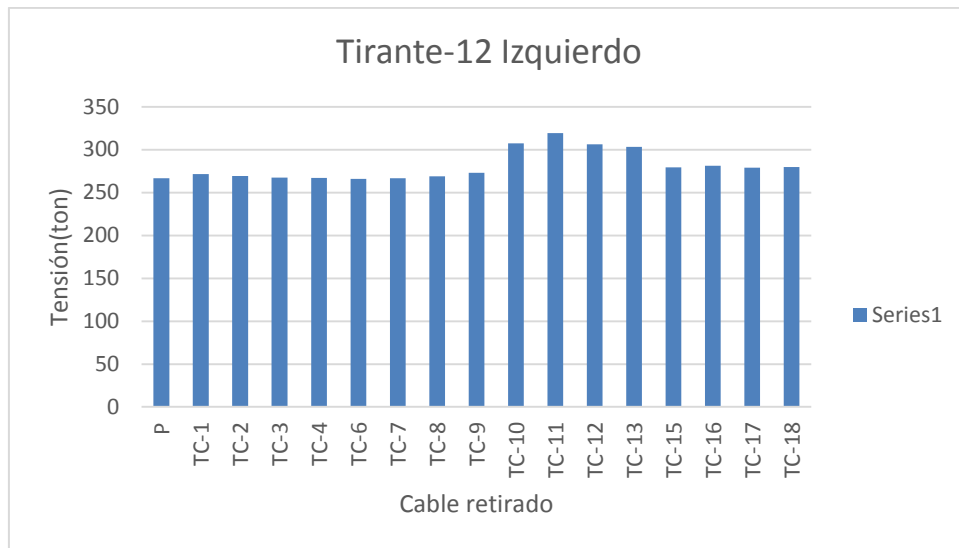


Ilustración 4-40 Análisis de variabilidad tirante 12 izquierdo eliminando tirantes centrales

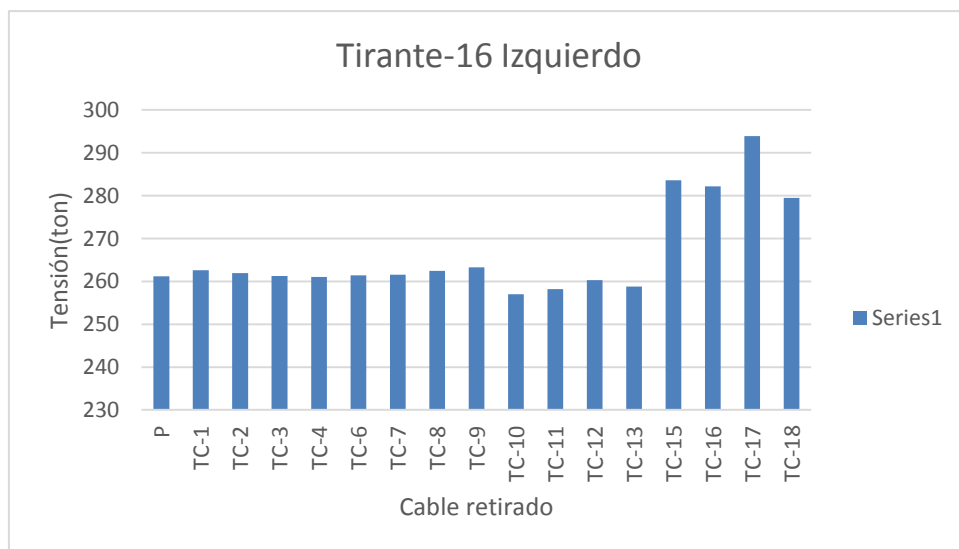


Ilustración 4-41 Análisis de variabilidad tirante 16 izquierdo eliminando tirantes centrales

Al eliminar uno por uno los tirantes centrales se obtuvo una variación de esfuerzos mayor en los tirantes 6 y 3 como se muestra en la Ilustración 4-37 y Ilustración 4-38. Al eliminar los tirantes centrales se evidencio un escenario de variación de esfuerzos más desfavorable que al eliminar los tirantes izquierdos y derechos. Sin embargo ninguno de los tirantes monitoreados sobrepasa su resistencia última.

## **5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **5.1 DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS REALES DE LOS CABLES EN EL PUENTE A PARTIR DE MEDICIONES DE VIBRACIÓN DE LOS CABLES O DIRECTAMENTE A PARTIR DE CELDAS DE CARGA.**

El análisis de los datos obtenidos a partir de las celdas de carga y de las mediciones de vibración permitió verificar que todos los cables se encuentran dentro del equilibrio permisible que recomienda "POST TENSIONING INSTITUTE" como se muestra en las Ilustración 4-1 e Ilustración 4-2. Lo cual evidencia que las tensiones están en equilibrio en ambos lados del puente.

A partir de los registros de las celdas de carga desde el 6 de junio de 2011 hasta 28 de julio de 2014, en dichos registros se evidencian picos importantes en la tensión, posiblemente debido a pretensionamientos en la etapa constructiva, sin embargo estos picos se encuentran dentro del rango de tensiones estimados durante la etapa de diseño y se descarta la posibilidad de que durante la fase constructiva se haya presentado sobretensión en los tirantes.

En la Ilustración 4-15, Ilustración 4-16, Ilustración 4-17, Ilustración 4-18 e Ilustración 4-19 se evidencia una discrepancia alta entre las mediciones de celdas de carga y las de las mediciones de vibración, esto se debe a que los valores obtenidos a través de mediciones de vibración fueron calculados por medio de fórmulas empíricas.

## **5.2 COMPARAR LOS ESFUERZOS REALES EN LOS CABLES CON LOS ESFUERZOS OBTENIDOS A PARTIR DEL MODELO NUMÉRICO UTILIZADO EN LA ETAPA DE DISEÑO.**

Se deduce que la mayoría de los elementos del puente se comportan de acuerdo a lo estimado en la etapa de diseño. Estos resultados son favorables desde el punto de vista de seguridad del puente, debido a que las fuerzas están distribuidas de acuerdo al diseño diseñado y ningún elemento presenta sobre esfuerzo.

Las mediciones de vibración se realizaron con el propósito de conocer la frecuencia natural de cada tirante, a partir de estas frecuencias se calcularon las tensiones por medio de fórmulas empíricas. Las mediciones no se realizaron en los 51 tirantes del puente, se tomaron medidas de 5 cables del sector izquierdo del puente. Las tensiones calculadas se encuentran acordes a lo establecido en la etapa de diseño, cabe resaltar que en los tirantes no se verifico su resistencia para carga viva

Debido a limitaciones con el software no fue posible estimar las tensiones de los tirantes para el caso de carga de viva, por lo que no es posible concluir con certeza si las tensiones recolectadas a través de celdas de carga coinciden con las estimadas en la etapa de diseño, al igual que no fue posible tomar mediciones con carga viva debido a que esto implica cerrar el puente y pasar vehículos tratando de simular las líneas de influencia. Simular la carga viva se sale de la capacidad logística del proyecto.

### **5.3 IDENTIFICAR ANALÍTICAMENTE LOS RANGOS DE VARIACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LOS ELEMENTOS DEL PUENTE DEBIDO A LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS ESFUERZOS REALES EN LOS CABLES Y LOS ESTIMADOS INICIALMENTE EN LA ETAPA DE DISEÑO.**

El análisis de las tensiones estimadas durante la etapa de diseño y las tensiones reales en el puente permitió comparar la variación de los demás elementos del puente, tablero y torre.

En la torre izquierda se evidencio un aumento de los esfuerzos del 0.85%, mientras que en la torre derecha una disminución del 0.67% como se evidencia en la Ilustración 4-23 e Ilustración 4-26, lo que indica que la variación de esfuerzos de las torres no es significativa con respecto a las estimadas en la etapa de diseño y se comportan acordes a lo estimado por el ingeniero diseñador.

Al comparar los máximos esfuerzos en el tablero en la dirección suroriente se presentó una variación del 0.96% mientras que en el sentido suroccidente no se presentó ninguna variación como se evidencia en la Ilustración 4-21, Ilustración 4-22, Ilustración 4-24 y Ilustración 4-25. Se evidencia que la mayor concentración de esfuerzos se genera en la conexión del tablero con los pilares.

## 6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En este estudio se estimaron las tensiones mediante fórmulas empíricas mediante la frecuencia fundamental y considerando la flecha del cable, las formulas empíricas se emplean con el propósito de evitar el uso de las ecuaciones trascendentales. Las fórmulas empíricas propuestas se verificaron mediante la comparación de los datos reportados por la empresa Inteinsa S.A, los obtenidos en el modelo numérico y los obtenidos en las pruebas de campo. Esto con el propósito de conocer la distribución de esfuerzos reales en el puente y el comportamiento del puente. Mediante un estudio de sensibilidad de la variación de esfuerzos debido a variaciones de las tensiones de los tirantes se verifico si los tirantes llegaban a su estado límite de falla.

Las siguientes conclusiones pueden extraerse de los resultados

1. El modelo ha sido verificado en cierta medida a través de la estimación de las tensiones mediante fórmulas empíricas, en la que las tensiones del modelo numérico no presentan una variación notoria respecto a las obtenidas mediante las pruebas de campo, por lo cual los esfuerzos en los diferentes elementos del puente están acordes a lo contemplado en la etapa de diseño.
2. La confiabilidad de las mediciones de vibración y el cálculo de las tensiones por medio de formulas empíricas resulta ser una buena herramienta para verificaciones rutinarias de la estructura, del mismo modo sería una herramienta práctica a la hora de hacer una evaluación del estado de un puente previamente construido.
3. Gracias a la confiabilidad del método de mediciones de vibración basado en la fuerza, se evita utilizar un gato hidráulico para hacer controles de los tirantes para evaluar que cumplan con las diferentes normas y, en caso extremo, hacer rediseños de los mismos.
4. Debido a las limitaciones de entrada de datos con el software sap2000 no es posible estimar la redistribución de esfuerzos real del puente sino un estimado de como es el comportamiento con las tensiones de los cinco tirante monitoreados.
5. Dos de los cinco tirantes monitoreados presentan esfuerzos mayores a los generados por el peso propio pero no exceden el esfuerzo generados por el peso propio más carga muerta, lo cual no compromete la integridad estructural de la estructura.
6. Se evidencio en el análisis de variabilidad de los tirantes que el escenario más desfavorable de variaciones de esfuerzo se presenta al eliminar los tirantes centrales, debido a que estos son los de mayor área y por consiguiente los que mayor esfuerzos soportan.
7. En el puente no se presenta una variación considerable en la distribución de esfuerzos debido a que los elementos se comportan de acuerdo a lo estimado en la etapa de diseño.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Análisis Modal*. . (s.f.). Recuperado el 2014 de 5 de 3, de  
[https://www5.uva.es/guia\\_docente/uploads/2011/389/51446/1/Documento16.pdf](https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2011/389/51446/1/Documento16.pdf)
- Duque, M. d. (2010). *estructuras eia*. Recuperado el 17 de 09 de 2013, de  
<http://estructuras.eia.edu.co/estructurasl/cargas/fuerzas%20y%20metodos.htm>
- Edgar Muñoz, F. N. (7 de 9 de 2009). Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. *Revista Ingeniería de Construcción*, 285-323.
- ElColombiano. (12 de 04 de 2012). *Puente de la calle 4sur, una mirada aérea*.  
Recuperado el 2013 de 10 de 2013, de  
[http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/P/puente\\_de\\_la\\_calle\\_4sur\\_una\\_mirada\\_aerea/puente\\_de\\_la\\_calle\\_4sur\\_una\\_mirada\\_aerea.asp](http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/P/puente_de_la_calle_4sur_una_mirada_aerea/puente_de_la_calle_4sur_una_mirada_aerea.asp)
- Emcocables. (20 de octubre de 2014). Alambre y torones para concreto preesforzado. Encocables.
- G. Matteoni, C. (2012). Effects of bridge cables surface roughness and cross-sectional distortion on. *Journal of Wind Engineering*, 176-187.
- Giordano Avellaneda, R. N. (31 de 8 de 2012). Desarrollo de un algoritmo computacional para la estimación de la tensión de cables en puentes atirantados con base en la medición experimental en laboratorio y campo de sus modos y frecuencias naturales de vibración. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 27 No3, 155-180.
- Inteinsa, i. i. (2011). *Instrumentación puente 4Sur*. Medellín.
- Lamine Dieng a, ⚭. G. (2013). *Use of Shape Memory Alloys damper device to mitigate vibration*. Francia.
- Manzano, M. e. (2007). *Análisis y diseño de un puente atirantado*. Quito.
- Quintana, M. F. (2013). Métodos constructivos de puentes atirantados. 0-16.
- Transformada de Fourier*. (s.f.). Recuperado el 02 de 06 de 2014, de  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_de\\_Fourier](http://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier)
- Universidad Nacional de Córdoba. (2013). Vibraciones Mecánicas y Dinámica de Máquinas. 33.

Virlogeux, M. (1999). Recent evolution of cable-stayed bridges. *Rue de la Division Leclerc*.

Wei-Xin Ren, G. C.-H. (2003). Experimental modal analysis of stayed cables in cable stayed bridges. *Department of Civil Engineering, Central South University, Changsha*.

Wei-Xin Ren, G. C.-H. (2005). Empirical formulas to estimate cable tension by cable. *Department of Civil Engineering, Central South University, Changsha*.

IAFRANCESCO VILLEGAS, Giovanni. *La investigación en educación y pedagogía: Fundamentos y técnicas*. 1ª ed. Bogotá, Editorial Magisterio, 2003. 160 p. ISBN 958-20-0690-0

TAMAYO Y TAMAYO, Mario. *Serie Aprender a Investigar, Módulo 5: El proyecto de investigación*. 3ª Ed. Bogotá, ICFES, 1999. 237 p..

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN,. *Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación*. NTC 1486 quinta actualización. Bogotá, ICONTEC, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN,. *Documentación. Citas y notas de pie de página*. NTC 1487, segunda actualización. Bogotá, ICONTEC, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN,. *Documentación. Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes*. NTC 1160 segunda actualización. Bogotá, ICONTEC, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN,. *Documentación. Referencias bibliográficas para publicaciones seriadas*. NTC 1308 segunda actualización. Bogotá, ICONTEC, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN,. *Documentación. Referencias bibliográficas para normas*. NTC 1307 segunda actualización. Bogotá, ICONTEC, 2000.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN,. *Referencias documentales para fuentes de información electrónicas*. NTC 4490. Bogotá, ICONTEC, 2000.

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA, BIBLIOTECA FRANCISCO JAVIER CLAVIJERO. *¿Cómo cito la información que encontré en internet?* [http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/biblioteca/articulos/pdf/refer\\_internet.pdf](http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/biblioteca/articulos/pdf/refer_internet.pdf) (4 febrero 2008)

